

Вестник Донского государственного технического университета

Теоретический и научно-практический журнал

Vestnik of Don State Technical University

Том 18 № 2 2018
Vol. 18 no. 2 2018

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006

1 Механика
Mechanics

2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/1992-5980

vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Т. 18, № 2

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
апрель-июнь 2018 г.

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
DOI: 10.23947/1992-5980

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим группам научных специальностей:

01.02.00 Механика
05.02.00 Машиностроение и машиноведение
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), а также в международной базе EBSCO
Является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 35578

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 28.06.2018.,
дата выхода в свет 30.06.2018.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman»
Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,6.
Тираж 1000 экз.
Заказ № 29/06 Цена свободная.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru

http://vestnik.donstu.ru/



VESTNIK of DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Theoretical and scientific-practical journal

4 issues a year
April – June 2018

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
DOI: 10.23947/1992-5980

Vol. 18, № 2

Founder and publisher — Don State Technical University

Included in the list of peer-reviewed scientific editions where the basic research results of doctoral, candidate's theses should be published (State Commission for Academic Degrees and Titles List)
Research Areas of the Journal
01.02.00 Mechanics
05.02.00 Machine Building and Machine Science
05.13.00 Information Technology, Computer Science, Management

The journal is indexed and archived in the Russian Science Citation Index (RSCI), and in EBSCO International Database.
The journal is a member of Association of Science Editors and Publishers (ASEP) and Cross Ref

Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-66004 of 06.06.2016. issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

The subscription index in Rospechat catalogue 35578

The issue is prepared by:
Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 28.06.2018,
imprint date 30.06.2018.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman».
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop.
Order no. 29/06 Free price.

Founder's, publisher's and printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia.
Phone: +7 (863) 2-738-372
E-mail: vestnik@donstu.ru

http://vestnik.donstu.ru/



Editorial Board

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2, с.144–145
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 144–145

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST



70 лет Флеку Михаилу Бенсионовичу – инженеру, ученому, руководителю

Flek, Mikhail B., Engineer, Scientist, leader, is 70



4 мая исполнилось 70 лет заведующему кафедрой «Авиастроение» ДГТУ, доктору технических наук, профессору Михаилу Бенсионовичу Флеку.

Окончив в 1971 году Ростовский институт сельхозмашиностроения по специальности «Автоматизация и комплексная механизация машиностроительной промышленности», Михаил Бенсионович начал трудовую деятельность на Ростовском вертолетном заводе. Здесь он прошел все ступени профессионального роста: инженер-технолог, начальник технологического бюро, начальник цеха, начальник механосборочного производства, заместитель генерального, а ныне управляющего директора ПАО «Роствертол».

С первых месяцев работы на одном из крупнейших авиастроительных предприятий страны Михаил Бенсионович проявил качества исследователя, способного увидеть в текущей, повседневной работе интересную научную проблему и подойти к ее решению, используя весь багаж накопленных знаний и осознавая необходимость его постоянного пополнения. Именно поэтому сразу после получения диплома инженера он, несмотря на большую производственную загруженность, начал активно сотрудничать с кафедрой «Автоматизация производственных процессов», где им были получены первые навыки, необходимые научному работнику сферы производственного инжиниринга.

Результаты исследований, содержащиеся в его кандидатской и докторской диссертациях, написанных под руководством профессора В. Л. Заковоротного и посвященных проблемам оптимального управления процессами обработки на станках с программным управлением, используются не только в технологической практике, но и при решении задач управления крупными организационными системами.

On May 4, Professor Mikhail Bensionovich Flek, Head of the Aircraft Engineering Department, DSTU, Dr.Sci. (Eng.) turned 70.

After graduating from the Rostov Institute of Agricultural Machinery in 1971 majoring in Automation and Complex Mechanization of the Machine-building Industry, Mikhail Bensionovich embarked on a career at the Rostov Helicopter Plant where he has passed all the career growth steps: production design engineer, manufacturing engineering supervisor, workshop manager, manager of the mechanical assembly production, deputy CEO. Nowadays, Mikhail B. Flek is Managing Director of “Rostvertol” JSC.

From the first months of work at one of the largest aircraft manufacturing enterprises of the country, Mikhail Bensionovich became known as a researcher who can see an interesting scientific problem in the daily work. He meets scientific challenges by using all his accumulated knowledge. Shortly after obtaining the Diploma in Engineering, despite his heavy production workload, Mikhail B. Flek began to work hand in glove with the Production Automation Department, DSTU, where he gained experience necessary for research in the sphere of industrial engineering.

He earned Cand.Sci. and Dr.Sci. in Engineering under the supervision of professor Zakovorotny V.L. His research results dealing with the problems of optimal control of CNC processing are used not only in technological practice, but also in solving management problems of the large organizational systems.

Михаилом Бенсионовичем Флеком опубликовано более 150 статей и монографий. Научные работы, выполненные лично им или под его руководством, неоднократно отмечались дипломами Союза авиапроизводителей России.

В 2017 году М. Б. Флек награжден орденом Дружбы, он является членом-корреспондентом Российской инженерной академии, академиком Академии транспорта РФ, доктором транспорта, почетным авиастроителем РФ.

Ежедневно сталкиваясь с серьезнейшими проблемами современного авиационного производства и потому четко сознавая важность для их решения глубоких и постоянно обновляемых профессиональных знаний, Михаил Бенсионович стал главным инициатором создания в 2002 году первой в стране корпоративной кафедры «Авиастроение» в ДГТУ при авиационном предприятии.

С момента образования и до 2014 года кафедру возглавлял генеральный директор ПАО «Роствертол» Б. Н. Слюсарь. В настоящее время этой кафедрой, выпустившей более 150 авиационных инженеров, большинство из которых являются руководителями конструкторских и технологических подразделений данного предприятия, заведует М. Б. Флек.

Mikhail B. Flek is the author of more than 150 papers and monographs. His scientific works, implemented personally or co-authored, were repeatedly honored with diplomas of the Union of Russian Aviation Manufacturers. In 2017 Mikhail B. Flek was awarded the Order of Friendship. He is Corresponding Member of the Russian Engineering Academy, Member of the Academy of Transport of the Russian Federation, Dr.Sci. in Transport, Honorary aircraft industry worker of the Russian Federation.

Need to solve every day key problems of the modern aviation production has lead M.B. Flek to the idea of creating the first in the country corporate Aircraft Engineering Department at the aviation enterprise. It was founded in 2002.

From 2002 and until 2014, the Department was headed by B.N. Slyusar, General Director of “Rostvertol” PJSC. Currently, Mikhail B. Flek is Head of the Department. More than 150 aviation engineers, most of whom are now managers of the design and industrial engineering departments of the enterprise, have graduated from the Department.

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 532.5, 004.94 DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156

Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора*

А. И. Уколов[1], В. П. Родионов[2]**
[1] Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Республика Крым, Российская Федерация
[2] Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

Modeling the inside defect of the jet cavitator ***

A. I. Ukolov[1], V. P. Rodionov[2] **
[1] Kerch State Marine Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation
[2] Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованию работы гидродинамического кавитатора, используемого при эрозийном воздействии на поверхность твердого тела, а также оптимизации структуры устройства для увеличения разрушительной способности кавитационной струи. В работе рассмотрено влияние единичного дефекта внутренней поверхности комбинированного сопла на объемную долю содержания пара и геометрию области кавитации. Целью работы является выявление методом численного моделирования закономерностей влияния дефекта внутренней поверхности кавитатора различной величины на гидродинамические и кавитационные характеристики сопла.

Материалы и методы. Использованы возможности программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS Workbench и интегрированного в него модуля оптимизации процесса разработки и технологической подготовки в области вычислительной динамики жидкостей и газов ANSYS CFX**.** В основу моделирования положены экспериментальные данные, полученные при истечении воды в кавитационном режиме из исследуемого сопла на специально разработанном лабораторном стенде.

Результаты исследования. Получены и представлены графические зависимости объемной доли содержания пара, полного давления и длины кавитационной области от расстояния вдоль оси струи при различной величине дефекта. Выявлены две фазы течения кавитационной струи в неидеальном кавитаторе, и показано влияние этого перехода на распределение скоростей в сечении устройства.

Обсуждение и заключения. Наличие внутреннего дефекта на поверхности расходящегося конусного участка комбинированного сопла размером менее четверти диаметра центрального цилиндрического участка может не вызывать визуальных изменений в геометрии области кавитации, однако значительно снижает эрозийную способность кавитационной струи. Дальнейшее увеличения дефекта приводит к полному подавлению кавитации потока, но

Introduction. The investigation of the hydrodynamic cavitator operation used under the erosion impact on a solid body surface, and of the device structure optimization for increasing the damage capability of the cavitating jet is presented. The effect of a sporadic defect of the combined nozzle inside on the volume fraction of the vapor content and the cavitation region geometry is considered. The work objective is to identify the influence pattern of the inside defect of cavitators of various sizes on the hydrodynamic and cavitational characteristics of the nozzle through numerical modeling.

Materials and Methods. The features of the ANSYS Workbench finite-element analysis software package and the integrated optimization module of the development and design process in the domain of the computational fluid dynamics ANSYS CFX are used. The simulation is based on the experimental data obtained under the nozzle water discharge at a specially designed laboratory bench under the cavitation condition.

Research Results. Graphic dependences of the volume fraction of the vapor content, total pressure and the length of the cavitation region on the distance along the axis of the jet for different defect sizes are obtained and presented. Two phases of the cavitating jet flow in a nonideal cavitator are identified, and the transition effect on the velocity distribution in the device section is shown.

Discussion and Conclusions. The occurrence of an internal defect on the surface of the conical pattern of a combined nozzle with the size of less than a quarter-diameter of the central cylindrical portion may not cause visual changes in the cavitation region geometry, but it significantly reduces the erosive capacity of the cavitation jet. A further defect increase results in a total suppression of the cavitation flow, but maintains its

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: vik-rodio@yandex.ru; ukolov_aleksei@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

сохраняет его динамические характеристики. Полученные результаты способствуют усовершенствованию конструкций гидродинамических кавитаторов, улучшению их эрозийного воздействия при использовании кавитации для очистки подводных конструкций и механизмов.

dynamic behavior. The obtained results contribute to the improvement of the hydrodynamic cavitators design, to the enhancement of their erosive impact with the use of cavitation for cleaning underwater structures and mechanisms.

Ключевые слова: кавитатор, затопленная струя, комбинированное сопло, дефект, давление, компьютерное моделирование, ANSYS CFX.

Keywords: cavitator, immersed jet, combined nozzle, defect, pressure, computer simulation, ANSYS CFX.

Образец для цитирования: Уколов, А. И. Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора / А. И. Уколов, В. П. Родионов // Вестник Дон. гос техн. ун-та. — 2018. — Т.18 № 2. — С.146–156. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156

For citation: A.I. Ukolov, V.P. Rodionov. Modeling the inside defect of the jet cavitator. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 146–156 DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156

Введение. Кавитация представляет собой многофазное и сложное физическое явление, определяемое как образование пузырьков пара в жидкости, когда давление локально падает ниже давления насыщенного пара. Рост пузырьков пара в метастабильной жидкости был впервые исследован Рэлеем [1], который представил приближенное аналитическое решение для роста сферически-симметричного пузырька только с учетом инерционной силы. Впоследствии исследования по процессу роста пузырьков проводились и проводятся во многих работах [2–4].

Кавитация классифицируется безразмерным параметром — числом кавитации:

$$\chi = \frac{2\left(p - p_{н}\right)}{\rho \upsilon^{2}}$$

где p — противодавление в затопленной полости, $p_н$ — давление насыщенных паров жидкости при температуре окружающей среды, ρ — плотность жидкости, υ — скорость потока. С уменьшением числа кавитации, путем увеличения скорости жидкости, наблюдается суперкавитация, которая заключается в образовании устойчивой газо-паровой области.

В ранние годы кавитация была нежелательным явлением, поскольку наносила большой ущерб гидравлическим машинам, турбинам и насосам, что приводило к разным уровням потери их эффективности в зависимости от интенсивности кавитации. Однако с увеличением числа исследований по кавитационному поведению было доказано, что кавитационные струи могут быть практически применимы во множестве полезных приложений. Кроме уже широко используемого явления ускорения химических реакций при приготовлении эмульсий и суспензий [5, 6], появляются новые современные технические решения использования суперкавитации. Среди них широко исследуемая экспериментально и теоретически [7, 8], в том числе и с использованием программных пакетов моделирования гидродинамических процессов [9–12], проблема снижения сопротивления движению подводных высокоскоростных аппаратов. Отдельно следует выделить область разработки и проектирования дизельных тепловых двигателей, в которых кавитация применяется не только для приготовления водно-дизельной эмульсии [13], но и серьезно влияет на коэффициент расхода топлива систем впрыска под высоким давлением [14].

Применение кавитационных струй главным образом связано с локальным, резким увеличением давления и температуры, возникающим в результате коллапса кавитационных пузырьков, а также с довольно сильными колебаниями давления, вызванными соударением кавитационной струи с твердой поверхностью. В более конкретных выражениях может быть получено давление в приближении 10 ГПа и температура выше 5000 К во время пикосекундного коллапса кавитационных пузырьков [15], что вызывает быстрое разрушение хрупких материалов. Более того, процесс схлопывания кавитационных пузырьков способен возбуждать ударные волны и высокоскоростные микроструйки, которые считаются основной механической причиной сильной эрозионной способности кавитационных струй [16–18]. По этой причине кавитационную эрозию применяют при очистке подводных конструкций и механизмов от загрязнений, биологических обрастаний и прочих нежелательных образований [18–22]. При эксплуатации морских судов, базирующихся в теплых морях, возникает большая проблема обрастания их подводной части различными моллюсками и балянусом. Наиболее эффективным и современным способом очистки от обрастаний поверхностей под водой является гидродинамический, использующий как динамическое воздействие, так и кавитационный эффект. В некоторых случаях, например, при обработке пластмассовых и стеклопластиковых корпусов, кавитационная очистка — единственное возможное решение во избежание повреждений поверхности.

Методы усиления интенсивности кавитации струй привлекли к себе значительное внимание в течение последних нескольких лет. При решении этого вопроса многие исследователи фокусируются на механизмах генерации, роста и коллапса кавитационных пузырьков, геометрии кавитационной области за счет оптимизации структуры сопел для создания более разрушительных кавитационных струй [23].

Для изготовления сопловых насадок и кавитаторов, которые в дальнейшем используются для создания струйных потоков жидкости, истекающей из них, требуется специальное оборудование. Это должны быть прецизионный станок, способный изготовить изделие с наименьшим биением шпинделя, специальный инструмент для данного вида сопловой насадки и строгое соблюдение технологического процесса, разработанного механиком-технологом. Чаще всего при изготовлении сопловых насадок не соблюдается методика их изготовления, и они не отвечают требованиям технического задания.

Долгое время исследование влияния дефектов и шероховатости внутренней стенки кавитаторов на поток и кавитационную характеристику сопла рассматривались как бесполезный параметр в общих исследованиях. Поэтому, несмотря на большое количество работ выполненных по моделированию геометрий или структур сопел, исследование дефектов обработки внутренней поверхности сопла и их влияние на кавитационную эрозию еще не было выполнено. Вместе с тем, шероховатость поверхности может иметь значительные последствия для генерации кавитационных пузырьков, длины кавитационной области, распределения объемной доли пара.

Кроме того, исследования кавитации в сопле инжектора дизельного двигателя показали, что при увеличении шероховатости внутренней поверхности, массовый расход и коэффициент расхода сначала возрастают, а затем уменьшаются [14]. Основываясь на анализе вариаций объемной доли пара и средней скорости потока на выходе из отверстия, было сделано заключение, что определенный уровень черновой обработки внутренней стенки отверстия может изменить характеристики потока за счет значительного подавления кавитации внутри сопла.

Таким образом, цель данной работы — исследовать методом численного моделирования влияние наличия дефектов внутренней поверхности кавитатора на кавитационные характеристики сопла, используемого для эрозийного воздействия при обработке твердых материалов.

Материалы и методы

Экспериментальные данные. С помощью визуальных наблюдений истечения струйных потоков из сопловых насадок можно частично выявлять некачественно изготовленные изделия. Однако окончательную оценку качественного изготовления можно дать только после комплекса испытаний изделия на специально разработанном стенде [24, 25], оборудованном чувствительными датчиками и контрольной аппаратурой.

Сопловые насадки, выполняющие роль возбудителей кавитации (кавитаторы), наиболее чувствительны к качеству их изготовления. При различных значениях гидростатического давления в окружающей затопленную струю жидкости кавитационный поток, истекающий из кавитатора изготовленного некачественно, может изменять свою структуру, направление движения, что существенно снижает эрозионную способность кавитации.

На рис. 1 представлены фотографии затопленных струй, истекающих из кавитатора, сделанного из прозрачного материала. Давление, подводимое к кавитатору — $p_{вх}$=10МПа, а противодавление в затопленной около кавитатора области изменяется в интервале $p_{к}$=0,1–0,4 МПа. На рис.1 хорошо просматривается тот факт, что с увеличением противодавления происходит смещение зоны скопления газопаровых пузырьков (каверны) струйного потока вправо. Этот факт позволяет судить о некачественном изготовлении внутренней поверхности кавитатора. Разработанный гидрокавитационный комплекс [24, 25] позволяет обнаружить следствие наличия дефекта обработки сопловой насадки. Причины искажения формы кавитационной струи можно выяснить при рассмотрении заведомо известной погрешности изготовления. Однако точно задать геометрию, размер и расположение нарушения плоскостности внутренней поверхности кавитатора — не простая практическая задача. Решить подобную проблему позволяет исследование гидродинамической кавитации при помощи компьютерного моделирования струйного истечения.

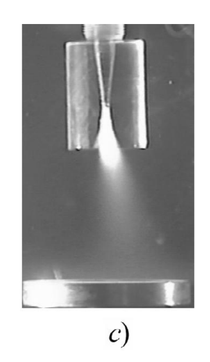


Рис. 1. Вид на истечение затопленных струй при различных параметрах противодавления в окружающей струю жидкости:
a — противодавление $p_к$ = 0,1 МПа, *b* — $p_к$ = 0,2МПа, *c* — $p_к$ = 0,4 МПа

Fig. 1. View of immersed jet discharge at various backward pressure parameters in ambient liquid: a —backward pressure p_k = 0.1MPa, b — p_k = 0.2MPa, c — p_k = 0.4MPa

Моделирование гидродинамических процессов средствами пакета конечных элементов ANSYS CFX — инструмент, который уже широко используется для оптимизации и проектирования различных частей гидродинамических устройств и их многофункционального анализа. ANSYS CFX является высокопроизводительной программой вычислительной гидродинамики, обеспечивающей надёжное и быстрое решение широкого круга задач, связанных с течениями жидкостей и газов, в том числе и с учетом кавитации [26–29].

Методика численного моделирования. При моделировании использована функция кавитации в ANSYS CFX, которая основана на уравнении Рэлея-Плессета:

$$R\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{2}{3}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2+\frac{2\sigma}{\rho R}=\frac{p_{\text{Н}}-p}{\rho} \quad (1)$$

где R — радиус кавитационного пузырька, $p_н$ — давление внутри пузырька (в модели — давление насыщенных паров), p — локальное давление в жидкости (абсолютное давление CFD-решателя), ρ — плотность жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

Поскольку решить уравнение (1) в общем виде невозможно, в модели Рэлея-Плессета ANSYS CFX его упрощают, пренебрегая вторым порядком и не учитывая поверхностное натяжение жидкости:

$$\frac{dR}{dt}=\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\ .$$

Скорость изменения объема пузырьков пара рассчитывается как

$$\frac{dV}{dt}=\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)=4\pi R^2\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\ ,$$

а скорость изменения массы

$$\frac{dm}{dt}=4\pi R^2\rho_g\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\ .$$

Уравнения, выражающие соотношения масс выделившегося и сконденсированного пара, принятые в расчете, имеют вид [10]:

$$m^+=F^+\frac{3\alpha\rho_g}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\quad (p<p_H)$$

$$m^-=-F^-\frac{3\alpha_0(1-\alpha)\rho_g}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\quad (p>p_H)\ ,$$

где α_0 — коэффициент связи объемной доли пара с массовой; R_0 — начальный радиус пузырька, ρ_g — плотность паровой фазы, F^+, F^- — константы моделирования.

Модель Рэлея-Плессета учитывает два фактора: скорость роста пузырька и статистический характер распределения пузырьков в кавитационном потоке. Объемная доля пара в ячейке учитывается статистически на основе определения числа зародышей n и их радиуса R_0 и определяется по формуле:

$$\alpha=\frac{4}{3}\pi R_0^3 n\ .$$

Модель кавитации Рэлея-Плессета, реализуемая в ANSYS CFX, требует задания таких параметров, как средний диаметр пузырька и давление насыщенного пара. По данным разных авторов [30–32], радиус пузырька в конце сжатия $R_{\min}$, как правило, находится в пределах 10^{-7}–10^{-8} м при начальном радиусе R_0=1×10^{-6} м. Таким образом, объем пузырька изменяется не менее, чем в 1000 раз, что и вызывает экстремальную концентрацию первоначально запасенной пузырьком энергии. Основной диаметр пузырьков пара (Main diameter) в уравнении Рэлея-Плессета выбран 2×10^{-6} м, давление насыщенных паров (Saturation Pressure) с учетом температуры моделируемой жидкости 25°C $p_{н}$ = 3170 Па. Остальные параметры моделирования, выбранные по умолчанию, считаются стандартными для большинства кавитационных течений.

В качестве исходного образца выбрано комбинированное сопло, состоящее из трех участков (рис. 2*a*). Первый — конусный сходящийся участок с углом θ_1=14° заканчивается цилиндрической частью внутренним диаметром d_0 = 2мм и длиной s = 1,75d_0. Третий участок конусной формы имеет угол раскрытия θ_2=45°. Истечение жидкости происходит в затопленное пространство (рис. 2 *b*), противодавление в котором задается в препроцессоре CFX и для всех расчетных моделей составляет 0,5 МПа. Сеточная модель тетраэдрического типа сгенерирована общим числом элементов 1,28 млн. Исследуемая жидкость — вода, плотностью ρ=1000 кг/м^3 при температуре T=25°C. Массовый расход через гидродинамическую систему 0,45 кг/с выбирался с учетом того, что полное давление по оси струи при реальном эрозийном использовании кавитационного потока составляет p_t ≈ 10–15 МПа.

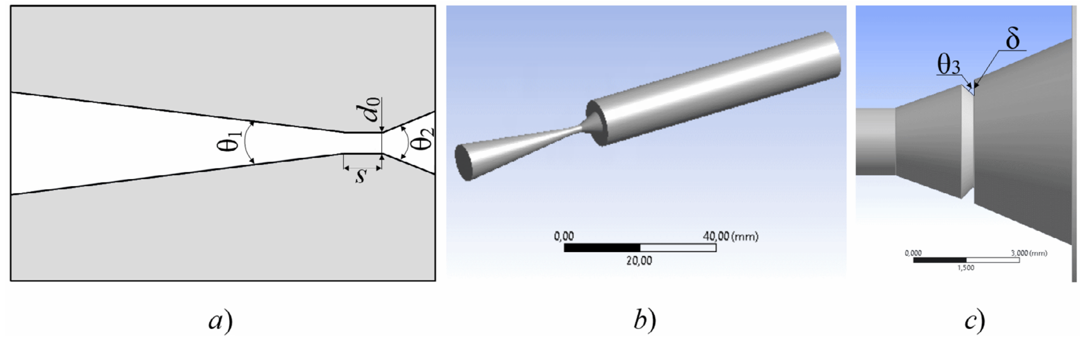


Рис. 2. Геометрия комбинированного сопла
a — схема проточной части кавитатора; *b* — внешний вид модели;
c — внутренний дефект расходящегося конусного участка
Fig. 2. Combined nozzle geometry
a — diagram of cavitator liquid end; b — model appearance;
c — internal defect of combined nozzle conical pattern

Наличие повреждений моделировалось на внутренней поверхности расходящегося конусного участка (рис. 2 *c*). Дефект в сечении представлял равнобедренный треугольник с углом θ_3=45° между равными сторонами δ. Вершина треугольника с углом θ_3 может находиться снаружи или внутри выходного конуса, тем самым уменьшая его объем.

Результаты исследования. На рис. 3 *a* представлен график зависимости объемной доли содержания пара от расстояния вдоль оси струи x для различных значений δ стороны треугольного дефекта. Начало координат соответствует началу цилиндрического участка. Для всех δ зависимость $w = f(x)$ имеет максимум, который с увеличением δ приближается к цилиндрическому участку. В случае с идеальным соплом (кривая 1 на рис. 3 *a*) максимум содержания паровой фазы в объеме приходится на значение w = 0,6, которое незначительно меняется при наличии в выходном конусе наружного дефекта (кривая 2 на рис. 3*a*). С увеличением объема расходящегося конуса за счет треугольного выступа распределение $w = f(x)$ заметно отличается от идеального случая только во второй части кавитационного «факела». Это отклонение в основном связано с изменением формы и не влияет на максимум концентрации пара и длину кавитационной области. Поэтому на рис. 3 *a* показана только одна зависимость $w = f(x)$ сопла с наружным дефектом δ=0,5мм. Для остальных значений δ кривые на графике плотно располагаются и мало отличимы.

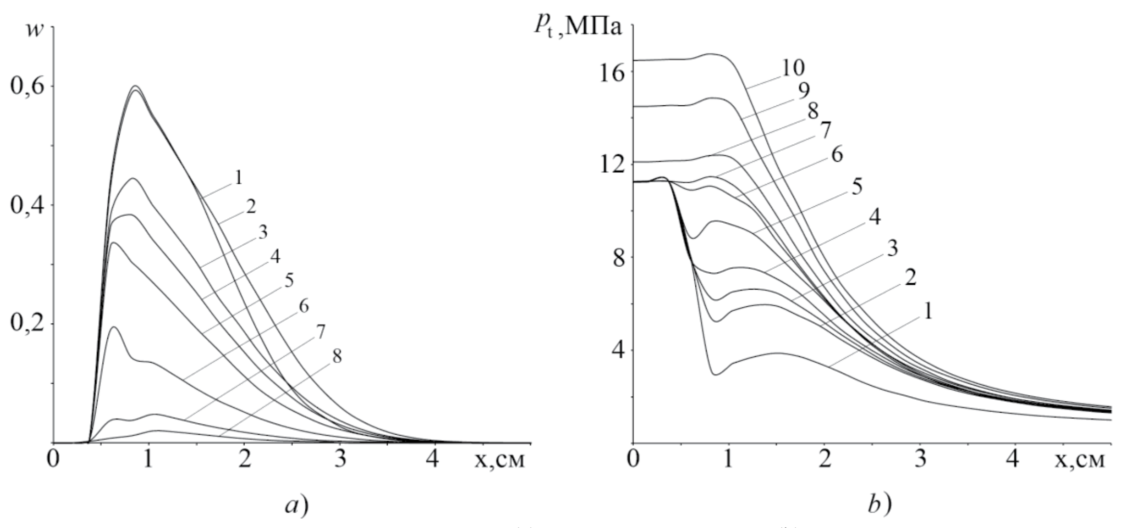


Рис. 3. Зависимость объемной доли содержания пара *w* (a) и полного давления p_t (b) от расстояния вдоль оси струи *x* при различной величине дефекта δ, измеряемого в мм: 1 — 0; 2 — 0,5 (дефект наружу); 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,5; 6 — 0,7; 7 — 0,8; 8 — 0,85; 9 — 0,9; 10 — 1

Fig. 3. Dependence of volume fraction of vapor content *w* (a) and total pressure p_t (b) on distance along jet X-axis for various defect values δ in mm; 1–0; 2–0.5 (defect out); 3–0.3; 4–0.4; 5–0.5; 6–0.7; 7–0.8; 8–0.85; 9–0.9; 10–1.

Образование треугольного дефекта с вершиной внутрь объема расходящегося конуса снижает развитие кавитации, а при величине $\delta = 0{,}5d_0$ полностью подавляет ее. Максимум содержания пара в потоке жидкости падает и при δ = 1мм составляет менее 0,001%. С увеличением δ длина кавитационной зоны *l* меняется неравномерно (рис. 4) и по характеру спада не повторяет *w*. При значениях $\delta < 0{,}2d_0$ *l* незначительно возрастает, а в интервале $0{,}2 < \delta < 0{,}4d_0$ остается равной длине кавитационного «факела» идеального сопла. Дальнейшее увеличение δ приводит к резкому сокращению области кавитации и $l \approx 0$ при $\delta = 0{,}5d_0$.

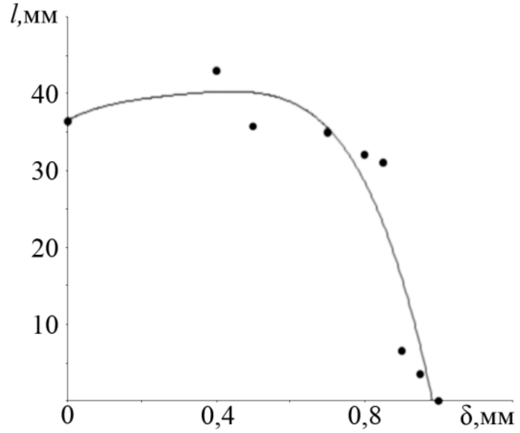


Рис. 4. Зависимость длины кавитационной области *l* от величины дефекта δ

Fig.4 Dependence of cavitation region length l on defect value δ

Подобная закономерность наблюдается и для зависимости полного давления потока жидкости p_t от расстояния вдоль оси струи (рис. 3 *b*). Поскольку постоянной величиной в моделировании принят массовый расход, полное давление является функцией переменной, зависящей от кавитации струйного истечения. Наличие дефектов в выходном конусе сопла размером $\delta < 0{,}4d_0$ не влияет на величину p_t на цилиндрическом участке (кривые 1–7 на рис. 3 *b*) и качественно повторяет зависимость $p_t = f(x)$ идеально выполненного кавитатора, имея резкий спад после начала зарождения кавитации. Он достигает своего минимума в точке наибольшего значения *w* (рис. 3 *a*). Далее происходит плавное выравнивание p_t независимо от величины дефекта. Если же $\delta > 0{,}4d_0$, входное давление заметно возрастает (кривые 8–10 на рис. 3 *b*) и на протяжении всего сопла остается постоянным.

Таким образом, можно выделить две фазы течения кавитационной струи в неидеальном кавитаторе. На первом этапе, когда величина внутреннего дефекта менее $0{,}4d_0$, активное зарождение кавитационных пузырьков начинается непосредственно в конце цилиндрической части сопла, а длина кавитационной области слабо зависит от значения δ. Появление выступа, по сравнению с идеальным конусным участком, снижает объемную

долю содержания пара и спад полного давления в области зарождения кавитации. Второй этап течения при наличии дефекта $\delta > 0{,}4d_0$ характеризуется быстрым уменьшением длины области кавитации и концентрации паровой фазы практически до нуля. Уже при $\delta = 0{,}5d_0$ кавитация полностью подавляется внутри сопла, при этом полное давление возрастает внутри кавитатора и на выходе из него.

Кавитация в потоке жидкости наблюдается в местах быстрого изменения скорости течения жидкости, которое влечет за собой уменьшение давления. При постоянных значениях массового расхода величины противодавления в камере истечения струи для несжимаемой жидкости распределение скоростей потока будет определять характер зарождения, роста и схлопывания кавитационных пузырьков. На рис. 5 представлены поля скоростей жидкости для фазы течения с развитой кавитационной областью в идеальном кавитаторе (рис. 5 *a*) и при наличии выступа размером $\delta = 0{,}25d_0$ (рис. 5 *b*), а также для переходного процесса $\delta = 0{,}4d_0$ (рис. 5*c*) и подавления кавитации при $\delta = 0{,}5d_0$ (рис. 5 *d*). Расположение области максимальных скоростей изменяется от величины дефекта кавитатора, при этом остается постоянным на уровне 200–180 м/с. Для случая развитой кавитации жидкость достигает максимальной скорости в конце цилиндрического участка и уменьшается в расширяющемся участке гидродинамического устройства. Появление препятствия потоку приводит к появлению второй области повышенных скоростей, которая с увеличением размеров дефекта преобладает над снижающейся скоростью на входе в конусный участок.

Согласно уравнению (1) для несжимаемой жидкости процесс кавитации определяется локальным давлением жидкости, которое в CFD-решателе является абсолютным и равно

$$p_{abs} = p_{stat} + p_{ref}, \qquad (2)$$

где p_{stat} — статическое давление жидкости, p_{ref} — опорное давление, относительно которого измеряются любые давления, установленные в моделировании. В свою очередь, полное давление равно

$$p_t = p_{stat} + p_{dyn}, \qquad (3)$$

где $p_{dyn} = \dfrac{\rho\upsilon^2}{2}$ — динамическое давление жидкости, которое при постоянных значениях максимальной скорости υ не вносит вклад в падение полного давления для дефекта $\delta < 0{,}4d_0$ (кривые 1–6 на рис. 3,*b*). Распространение струи в затопленном пространстве при зарождении кавитации происходит в среде с переменной плотностью, зависящей от концентрации пузырьков газа или пара. При понижении статического давления на выходе из цилиндрического участка кавитатора до величины давления насыщенного пара $p_н$ резко увеличивается объем газо-жидкостной смеси за счет образования пузырьков, что в изотермических условиях течения приводит к дополнительному снижению давления и усилению кавитации. Появление препятствия потоку уменьшает скорость течения в цилиндрическом участке и исключает возможность появления кавитации, нивелируя и падение давления при образовании пузырьков пара, что согласно (2) и (3) отображается на зависимостях $w = f(x)$ и $p_t = f(x)$ (рис. 3).

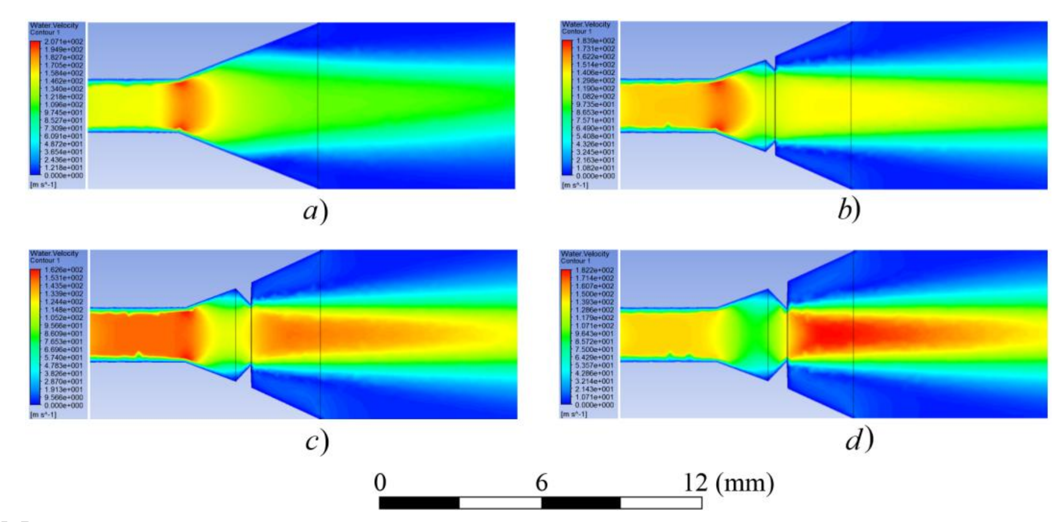


Рис. 5. Распределение скорости потока жидкости в среднем сечении кавитатора при различных значениях стороны треугольного дефекта: *a* — $\delta = 0$, *b* — $\delta = 0{,}5$ мм, *c* — $\delta = 0{,}8$ мм, *d* — $\delta = 1$ мм

Fig. 5. Distribution of fluid flow rate in cavitator midsection at various values of triangular defect side: a – δ = 0, b – δ = 0.5 mm, c – δ = 0.8 mm, d – δ = 1 mm

Обсуждение и заключение. Влияние единичного дефекта на внутренней поверхности расходящегося конусного участка на гидродинамические параметры истечения струи воды в кавитационном режиме можно разделить на две стадии. При небольших размерах (менее 0,4 части от диаметра цилиндрического участка кавитатора) сохраняются геометрические параметры кавитационной области, однако концентрация паровой фазы и полное давление уменьшаются. Наличие таких дефектов трудно выявить визуально без дополнительных количественных измерений. Они не нарушают симметрию струи, но снижают ее эрозийную способность. Во втором случае, если внутренний выступ относительно большой (более 0,4 части от диаметра цилиндрического участка кавитатора), происходит резкий спад объемной доли паровой фазы в затопленной струе до полного прекращения кавитации. При этом на выходе из гидродинамического устройства полное давление струи возрастает ввиду отсутствия снижения статического давления за счет образования пузырьков пара.

Таким образом, полученные в работе результаты способствуют усовершенствованию конструкций гидродинамических кавитаторов и улучшению их эрозийного воздействия при использовании кавитации для очистки подводных конструкций и механизмов.

Библиографический список

1. Rayleigh, L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity / L. Rayleigh // Journal of Philosophical Magazine. — 1917. — Vol. 34. — P. 94 – 98.

2. Plesset, M.S. A non-steady heat diffusion problem with spherical symmetry / M. S. Plesset, S.A. Zwick // Journal of Applied Physics. — 1952. — Vol. 23, iss. 1. — P. 95 – 98.

3. Mohammadein, S. A. Temperature distribution in a mixture surrounding a growing vapour bubble / S. A. Mohammadein, S.A. Gouda // Journal of Heat and Mass Transfer. — 2006. — Vol.42, iss. 5. — P. 359 – 363.

4. Hong Liu. A novel model for the bubble growth in the cavitation region of an injector nozzle / Hong Liu, Chang Cai, Xi Xi, Yan'an Yan, Ming Jia // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Vol. 119. — P. 128–138.

5. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник ТГТУ. — 2008. — Т. 14, № 4. — С. 861–869.

6 Промтов, М. А. Характеристики потока жидкости в каналах проточных гидродинамических статических кавитаторов / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Вестник ТГТУ. — 2013. — Т. 19, № 3. — С. 562–569.

7. Yunhua, J. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator / J. Yunhua, B.Tao, G.Ye // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 142. — P. 87–93.

8. Byoung-Kwon, Ahn. Experimental investigation of supercavitating flows / Byoung-Kwon Ahn, Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup Lee // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. — 2012. — Vol. 4, iss. 2. — P. 123 – 131.

9. Pendar, M. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models / M. R. Pendar, E. Roohi // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 112. — P. 287–306.

10. Ye-jun, G. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators / G. Ye-jun, Zh. Jie-min, L. Tian-zeng // Journal of hydrodynamics. — 2016. — Vol. 28, iss. 3. — P.431 — 441.

11. Ebrahim, K. The investigation of natural super-cavitation flow behind three- dimensional cavitators: Full Cavitation Model / K. Ebrahim, K. Erfan, J. Khodayar, J. Seyyed Morteza // Applied Mathematical Modelling. — 2017. — Vol. 45. — P. 165 — 178.

12. Young Kyun Kwack. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators / Young Kyun Kwack, Sung Ho Ko // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2013. – Vol. 5, iss. 3. – P. 325 – 332.

13. Авраменко, А. Н. Численное моделирование процесса обработки водотопливной эмульсии в бортовом гидродинамическом кавитаторе / А. Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2016. — № 1. — С. 63 – 71.

14. Zuo-Yu Sun. Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine / Zuo-Yu Sun, Guo-Xiu Li, Chuan Chen, Yu-Song Yu, Guo-Xi Gao // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 89, iss. 1. — P. 843–861.

15. Deng, L. Effects of nozzle inner surface roughness on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets / L. Deng, K. Yong, W. Xiaochuan, D. Xiaolong, F. Zhenlong // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2016. — Vol. 74. — P. 444 – 452.

16. Dular, M. On the mechanisms of cavitation erosion-coupling high speed videos to damage patterns / M. Dular, M. Petkovsek // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2015. — Vol. 69. — P. 359-370.

17. Hattori, S. Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles / S. Hattori, E. Nakao // Wear. — 2002. — Vol. 249. — P. 839 — 845.

18. Родионов, В. П. Струйная суперкавитационная эрозия / В. П. Родионов. — Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2005. — 223 с.

19. Родионов, В. П. Закономерности кавитационной эрозии конструкционных материалов / В. П. Родионов, А. И. Уколов // Вестник Дагест. гос. техн. ун-та. Технические науки. — 2017. — Т.44, №3. — С. 39–47.

20. Ладенко, А. А. Суперкавитационная технология очистки систем водоотведения / А. А. Ладенко, В. П. Родионов, Н. В. Ладенко // Научно-технический журнал «Энергоснабжение и водоотведение». — 2016. — Т. 103, №5. — С. 77–79.

21. Родионов, В. П. Суперкавитационная струйная экотехнология водолазных работ / В. П. Родионов. — Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2015. — 160 с.

22. Родионов, В. П. Энергосберегающие технологии очистки / В. П. Родионов, В. М. Лось. — Москва: Компания Крона-плюс, 2004. — 136с.

23. Гидрокавитационный генератор: патент №1614241 Российская Федерация: В 0F /00, В 08 В 03/12 / В. П. Родионов. — №4339321; заявл. 2.11.87; опубл. 24.05.93.

24. Гидродинамический стенд: патент №43069 Российская Федерация / В. М. Лось, В. П. Родионов, В. М. Курихин. — № 2004121579; заявл. 21.07.04; опубл. 27.12.04.

25. Лось, В. М. Гидродинамические установки высокого давления / В. М. Лось, В. П. Родионов. — Москва,2006. — 136 с.

26. ANSYS CFX. Computer simulation helps design more efficient water pumps // World Pumps. — 2004. — Vol. 453. — P. 32–34.

27. Tsutsumi, K. Cavitation simulation of automotive torque converter using a homogeneous cavitation model / K. Tsutsumi, S. Watanabe, S. Tsuda, T. Yamaguchi // European journal of mechanics - B/Fluids. — 2017. — Vol. 61, iss 2. — P. 263—270.

28. Алексенский, В. А. Расчетное определение кавитационных характеристик центробежных насосов / В. А. Алексенский, А. А. Жарковский, П. В. Пугачев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13, №1 (2). — С. 411–414.

29. Уколов, А. И. Моделирование колеса центробежного насоса с максимальным эффектом кавитации / А. И. Уколов, В. П. Родионов, П. П. Старовойтов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — №5. — С. 910–919.

30. Кулагин, В. А. Гидрогазодинамика: электрон. учеб. пособие / В. А. Кулагин, Е. П. Грищенко. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 278 с.

31. Petkovsek, M. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration / M. Petkovsek, M. Mlakar, M. Levstek et al. // Ultrasonics Sonochemistry. — 2015. — Vol. 26. — P. 408—414.

32. Оптимизационное проектирование проточной части магистрального нефтяного насоса с использованием TURBO инструментов ANSYS / С. Г. Валюхов [и др.] // Насосы. Турбины. Системы. — 2015. — Т. 14, № 1. — С. 56–68.

References

1. Rayleigh, L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Journal of Philosophical Magazine, 1917, vol. 34, pp. 94 – 98.

2. Plesset, M.S., Zwick, S.A. A non-steady heat diffusion problem with spherical symmetry. Journal of Applied Physics, 1952, vol. 23, iss. 1, pp. 95 – 98.

3. Mohammadein, S.A., Gouda, S.A. Temperature distribution in a mixture surrounding a growing vapour bubble. Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, vol. 42, iss. 5, pp. 359 – 363.

4. Hong Liu, Chang Cai, Xi Xi, Yan'an Yan, Ming Jia. A novel model for the bubble growth in the cavitation region of an injector nozzle. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, vol. 119, pp. 128–138.

5. Promtov, M.A. Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnologiy dlya intensifikatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov. [Prospects of Cavitation Technologies Application for Intensification of Chemical Technological Processes.] Transactions of TSTU, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 861–869 (in Russian).

6 Promtov, M.A., Stepanov, A.Yu., Aleshin, A.V. Kharakteristiki potoka zhidkosti v kanalakh protochnykh gidrodinamicheskikh staticheskikh kavitatorov. [Characteristics of fluid flow in the channels of circulating hydrodynamic static cavitators.] Transactions of TSTU, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 562–569 (in Russian).

7. Yunhua, J., Tao, B., Y, G. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator. Ocean Engineering, 2017, vol. 142, pp. 87–93.

8. Byoung-Kwon Ahn, Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup Lee. Experimental investigation of supercavitating flows. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, vol. 4, iss. 2, pp. 123 – 131.

9. Pendar, M.R., Roohi, E. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models. Ocean Engineering, 2016, vol. 112, pp. 287–306.

10. Ye-jun, G., Jie-min, Zh., Tian-zeng, L. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators. Journal of hydrodynamics, 2016, vol. 28, iss. 3, pp. 431 — 441.

11. Ebrahim, K., Erfan, K., Khodayar, J., Seyyed Morteza, J. The investigation of natural super-cavitation flow behind three- dimensional cavitators: Full Cavitation Model. Applied Mathematical Modelling, 2017, vol. 45, pp. 165 — 178.

12. Young Kyun Kwack, Sung Ho Ko. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, vol. 5, iss. 3, pp. 325 – 332.

13. Avramenko, A.N. Chislennoe modelirovanie protsessa obrabotki vodotoplivnoy emul'sii v bortovom gidrodinamicheskom kavitatore. [Numerical problem of process of influence water-fuel emulsion in on-board hydrodynamic cavitator.] Internal Combustion Engines, 2016, no. 1, pp. 63 – 71 (in Russian).

14. Zuo-Yu Sun, Guo-Xiu Li, Chuan Chen, Yu-Song Yu, Guo-Xi Gao. Numerical investigation on effects of nozzle’s geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector’s nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine. Energy Conversion and Management, 2015, vol. 89, iss. 1, pp. 843–861.

15. Deng, L., Yong, K., Xiaochuan, W., Xiaolong, D., Zhenlong, F. Effects of nozzle inner surface roughness on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, vol. 74, pp. 444 – 452.

16. Dular, M., Petkovsek, M. On the mechanisms of cavitation erosion-coupling high speed videos to damage patterns. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, vol. 69, pp. 359-370.

17. Hattori, S., Nakao, E. Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles. Wear, 2002, vol. 249, pp. 839 — 845.

18. Rodionov, V.P. Struynaya superkavitatsionnaya eroziya. [Jet supercavitating erosion.] Krasnodar: GOUVPO KubGTU, 2005, 223 p. (in Russian).

19. Rodionov, V.P., Ukolov, A.I. Zakonomernosti kavitatsionnoy erozii konstruktsionnykh materialov. [The laws of cavitation erosion of construction materials.] Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017, vol. 44, no. 3, pp. 39–47 (in Russian).

20. Ladenko, A.A., Rodionov, V.P., Ladenko, N.V. Superkavitatsionnaya tekhnologiya ochistki sistem vodootvedeniya. [Superhydrocavitational technology of cleaning of systems of water disposal.] Energy Saving and Water Removal, 2016, vol. 103, no. 5, pp. 77–79 (in Russian).

21. Rodionov, V.P. Superkavitatsionnaya struynaya ekotekhnologiya vodolaznykh rabot. [Supercavitational jet diving ecotechnology.] Krasnodar: GOUVPO KubGTU, 2015, 160 p. (in Russian).

22. Rodionov, V.P., Los, V.M. Energosberegayushchie tekhnologii ochistki. [Energy-saving cleaning technologies.] Moscow: Kompaniya Krona-plyus, 2004, 136 p. (in Russian).

23. Rodionov, V.P. Gidrokavitatsionnyy generator: patent №1614241 Rossiyskaya Federatsiya. [Hydrocavitational generator] Patent RF, no. 1614241, 1993 (in Russian).

24. Los, V.M., Rodionov, V.P., Kurikhin, V.M. Gidrodinamicheskiy stend: patent №43069 Rossiyskaya Federatsiya. [Hydrodynamic stand.] Patent RF, no. 43069, 2004 (in Russian).

25. Los, V.M. Rodionov, V.P. Gidrodinamicheskie ustanovki vysokogo davleniya. [High-pressure hydrodynamic plants.] Moscow, 2006, 136 p. (in Russian).

26. ANSYS CFX. Computer simulation helps design more efficient water pumps. World Pumps, 2004, vol. 453, pp. 32–34.

27. Tsutsumi, K., Watanabe, S., Tsuda, S., Yamaguchi, T. Cavitation simulation of automotive torque converter using a homogeneous cavitation model. European journal of mechanics - B/Fluids. 2017, vol. 61, iss 2, pp. 263—270.

28. Aleksensky, V.A., Zharkovsky, A.A., Pugachev, P.V. Raschetnoe opredelenie kavitatsionnykh kharakteristik tsentrobezhnykh nasosov. [Calculation definition of centrifugal pumps cavitational characteristics.] Izvestia RAS SamSC, 2011, vol. 13, no. 1(2), pp. 411–414 (in Russian).

29. Ukolov, A.I., Rodionov, V.P., Starovoytov, V.P. Modelirovanie kolesa tsentrobezhnogo nasosa s maksimal'nym effektom kavitatsii. [Simulation of centrifugal pump impeller with maximum cavitation effect.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2017, no. 5, pp. 910–919 (in Russian).

30. Kulagin, V.A., Grishchenko, E.P. Gidrogazodinamika: elektron. ucheb. Posobie. [Fluid and gas dynamics.] Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009, 278 p. (in Russian).

31. Petkovsek, M., Mlakar, M., Levstek, M., et al. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, vol. 26, pp. 408—414.

32. Valyukhov, S.G., et al. Optimizatsionnoe proektirovanie protochnoy chasti magistral'nogo neftyanogo nasosa s ispol'zovaniem TURBO instrumentov ANSYS. [Optimising design of the flowing part of the main oil pump with use of TURBO of the ANSYS tools.] Pumps. Turbines. Systems. 2015, vol. 14, no. 1, pp. 56–68 (in Russian).

Поступила в редакцию 14.03.2018
Сдана в редакцию 18.03.2018
Запланирована в номер 15.04.2018

Received 14.03.2018
Submitted 18.03.2018
Scheduled in the issue 15.04.2018

Сведения об авторах:

Уколов Алексей Иванович,
доцент кафедры «Математика, физика и информатика» Керченского государственного морского технологического университета (РФ, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат физико-математических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2467-3379
ukolov_aleksei@mail.ru

Родионов Виктор Петрович,
профессор кафедры «Гидравлика» Кубанский государственный технологический университет (РФ, г. Краснодар, ул. Московская, 2), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-7298
vik-rodio@yandex.ru

Authors:

Ukolov, Alexey I.,
associate professor of the Mathematics, Physics and Computer Science Department, Kerch State Marine Technological University (RF, Republic of Crimea, Kerch, ul. Ordzhonikidze, 82), Cand.Sci. (Phys.-Math.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2467-3379
ukolov_aleksei@mail.ru

Rodionov, Victor P.,
professor of the Hydraulics Department, Kuban State Technological University (RF, Krasnodar, ul. Moskovskaya, 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-7298
vik-rodio@yandex.ru

Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2, с. 157–162
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 157–162

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 536.248.2.001.24 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-157-162

Гистерезис теплообмена при кипении бинарных смесей жидкостей [*]

В. В. Кожокару[1], Е. В. Лыков[2], Е.С. Желонкина[3]**
[1]Южный проектный институт, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Heat transfer hysteresis under liquid binary mixtures boiling[***]

V. V. Kozhokaru[1], E. V. Lykov[2], E. S. Zhelonkina[3]**
[1]Southern Project Institute, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена изучению динамики нагрева при кипении бинарных смесей в большом объеме. Цель данной работы — экспериментально исследовать гистерезис по тепловому потоку при кипении бинарных смесей жидкости.
Материалы и методы. Эксперименты проводились на цилиндрическом нагревателе, который служил термометром сопротивления и датчиком выделяемой мощности. Нагрев производился квазистационарным методом. Объектом исследования были бинарные водные смеси жидкостей.
Результаты исследования. Результатом экспериментов стало получение кривых кипения при насыщенном и ненасыщенном кипении. На полученных кривых нагрева и охлаждения наблюдаются несколько характерных областей. Первая, где в жидкости теплообмен осуществлялся при помощи конвекции, и вторая — область пузырькового кипения, где обнаруживается гистерезис по тепловому потоку. Вскипание жидкости сопровождалось возникновением шума и «скачком» средней температуры поверхности нагрева. На кривой $\alpha(T_{cm})$ выявлен гистерезис теплоотдачи. Кривая нагрева проходит всегда ниже, чем кривая охлаждения. То есть при заданной температуре нагревателя коэффициент теплоотдачи всегда будет больше при охлаждении, чем при нагреве. Этот факт был обнаружен как при однократном, так и при многократных нагревах и охлаждениях. Кривая кипения — это две синхронно полученные в одном эксперименте зависимости $q(T_{cm})$ и $\alpha(T_{cm})$. На кривой кипения обнаружен гистерезис коэффициента теплоотдачи при нагреве и охлаждении нагревателя.
Обсуждение и заключения. Наряду с гистерезисом по тепловому потоку кипящих смесей впервые обнаружен гистерезис коэффициента теплоотдачи. Причиной гистерезиса по тепловому потоку являются разные значения теплоотдачи на кривой нагрева и кривой охлаждения при любой заданной T_{cm}. Динамика нагрева показывает, что

Introduction. Heating dynamics under binary mixtures pool boiling is considered. The work objective is to experimentally investigate the hysteresis on heat flux under the liquid binary mixtures boiling.
Materials and Methods. The experiments were conducted on a cylindrical heater which served as a resistance thermometer and a generated power. The heating was carried out by a quasi-steady-state method. Binary liquid mixtures were the target of the research.
Research Results. The experiments result in obtaining boiling curves under the saturated and unsaturated boiling. On the generated heating and cooling curves, several specific areas are observed. The first is the area where heat exchange is carried out in a liquid through convection, and the second is the bubble boiling region where the hysteresis is detected by the heat flux. The liquid flashing is followed by the noise generation and a jump in the mean temperature of the heating surface. The hysteresis of heat transfer is found out on the curve α (T_{cm}). The heating curve always passes below the cooling curve. That is, for the given heater temperature, the heat-transfer factor will always be greater under cooling than under heating. This fact is observed both under single and multiple heating and cooling. The boiling curve is two dependences q (T_{cm}) and α (T_{cm}) synchronously obtained in one experiment. The hysteresis of the heat-transfer coefficient is detected on the boiling curve under heating and cooling of the heater.
Discussion and Conclusions. Along with the hysteresis on the heat flux of the boiling mixtures, the hysteresis of the heat-transfer coefficient is first detected. The cause of hysteresis on the heat flux is various heat-transfer values on the heating and cooling curves at any specified Тст. The heating dynamics

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: kogokary@rambler.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

кривая нагрева, как для тепловых потоков, так и для коэффициента теплоотдачи, проходит всегда при более низких значениях этих величин (q и α), чем кривая охлаждения.

shows that the heating curve, both for heat fluxes and for the heat-transfer factor, always passes at lower values of these quantities (q и α) than the cooling curve.

Ключевые слова: кипение бинарных смесей, кривая кипения, гистерезис по тепловому потоку, гистерезис по коэффициенту теплоотдачи.

Keywords: binary mixtures boiling, boiling curve, hysteresis on heat flux, hysteresis on heat-transfer coefficient.

Образец для цитирования: Кожокару, В. В. Гистерезис теплообмена при кипении бинарных смесей жидкостей / В. В. Кожокару, Е. В. Лыков, Е. С. Желонкина // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, №2. — С. 157–162. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-157-162

For citation: V. V. Kozhokaru, E. V. Lykov, E. S. Zhelonkina. Heat transfer hysteresis under liquid binary mixtures boiling. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 157–162. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-157-162

Введение. Открытие пиковых тепловых потоков [1] и максимумов акустического давления [2] в бинарных системах привлекает внимание многих ученых [3–5]. Данная статья является решением актуальной задачи, т.к. посвящена исследованию динамики нагрева при кипении бинарных смесей жидкостей.

При кипении имеют место акустический гистерезис и гистерезис по тепловому потоку. Авторы работы [6] впервые обратили внимание на акустический гистерезис при кипении. При изучении кипения недогретой воды авторы заметили, что при нагреве и охлаждении уровень шума имеет разные значения.

Гистерезис по тепловому потоку удобно рассматривать на графике зависимости плотности теплового потока q от температуры нагревателя $T_{ст}$. Полученную при увеличении температуры нагревателя часть кривой $q(T_{ст})$ называют кривой нагрева, а при уменьшении $T_{ст}$ — кривой охлаждения. В работе [7] показано, что при насыщенном кипении воды кривая нагрева проходит по другой траектории, чем кривая охлаждения. Этот экспериментальный факт авторы связывают с переходными процессами при кипении.

Цель данной работы — экспериментально исследовать гистерезис по тепловому потоку при кипении бинарных смесей жидкости и найти возможные закономерности.

Экспериментальная установка. Подвод тепла в жидкость осуществлялся от медной проволоки-нагревателя диаметром 100 мкм, длиной 49,5 мм. Нагреватель, через который пропускали постоянный электрический ток, погружался в жидкость на 1 см от поверхности жидкости и служил термометром сопротивления и датчиком выделяемой мощности. Средняя температура поверхности проволоки $T_{ст}$ определялась по ранее полученной градуировочной кривой зависимости температуры проволоки от сопротивления проволоки. Ток I и падение напряжения на проволоке U измерялось с помощью цифровых мультиметров и токовых клешей фирмы APPA. Данные сохранялись на ЭВМ с частотой 0,5 с.

Исследование проводились в бинарных смесях из системы вода-этанол и вода-1-бутанол. Температура ядра жидкости $T_я$ фиксировалась с помощью ртутного термометра ТЛ-2. Для её поддержания использовался прецизионный термостат с внешним подогревателем.

Был применен квазистатический метод нагрева, т. е. по мере монотонного увеличения температуры нагревателя $T_{ст}$ температура пристеночного слоя, плотность теплового потока q и количество центров парообразования медленно возрастали. Регулятор тока давал возможность плавного увеличения $T_{ст}$.

Общая и принципиальная схемы экспериментальной установки приведены в предыдущих работах авторов [8, 9].

Результаты экспериментов гистерезиса по тепловому потоку. На рис. 1, 2 приведены результаты экспериментов по гистерезису теплового потока. Были проведены опыты нескольких видов: первый, когда нагрев и охлаждение нагревателя происходили однократно (рис. 1), и второй, когда нагрев и охлаждение нагревателя происходили многократно (рис. 2).

На полученных кривых нагрева и охлаждения наблюдаются несколько характерных областей. Первая, где в теплообмен жидкости осуществлялся при помощи конвекции. Так, при нагреве смеси вода-этанол (10% по массе этанола) конвекция при 60°С протекала от начала эксперимента до возникновения кипения при $T_{ст}$= 126°С. При нагреве смеси вода-этанол (96% по массе этанола) конвекция наблюдалась на участке температур от 79°С до 98°С.

При незначительном увеличении электрической мощности на нагревателе возникало кипение. Вскипание жидкости сопровождалось возникновением шума и «скачком» средней температуры поверхности нагрева. На нагревателе наблюдалось несколько активных центров парообразования, на которых росли и отрывались паровые пузырьки.

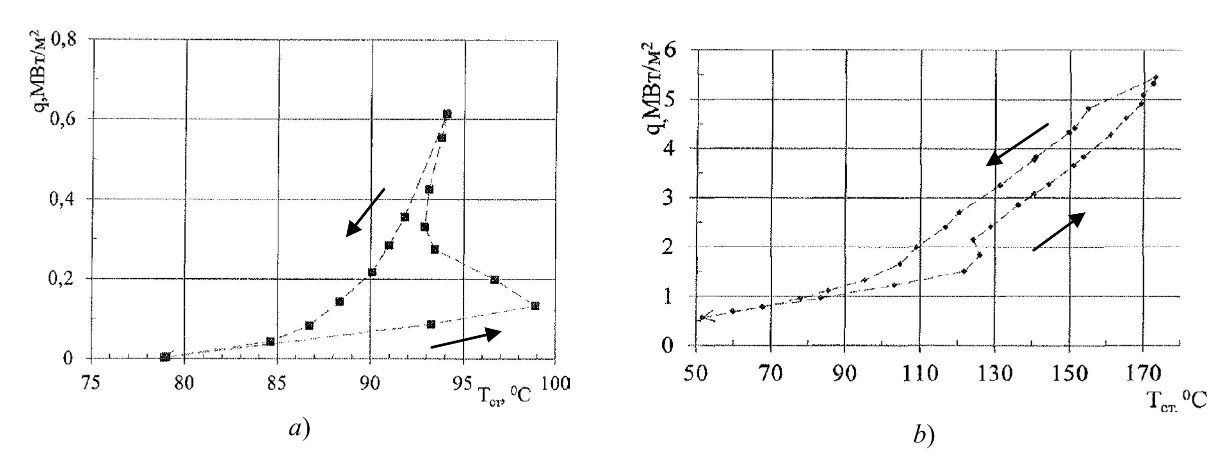


Рис. 1. Гистерезис по тепловому потоку в области пузырькового кипения: a — в смеси вода-этанол (96% по массе этанола) — насыщенное кипение; b — в смеси вода-этанол (10% по массе этанола) при $T_я$= 20°C

Fig. 1. Hysteresis on heat flux in bubble boiling region: a - in water-ethanol mixture (96% by ethanol mass) – saturated boiling, b - in water-ethanol mixture (10% by ethanol mass) at $T_я$ = 20°C.

Важно отметить, что кипение возникало при температурах больших, чем температура кипения исследуемых жидкостей. Этот факт хорошо согласуется с исследованиями, проводившимися в дистиллированной воде. По данным [10], при исследовании ненасыщенного кипения ($T_я$=20°C) перегрев жидкости $\Delta T = (T_{ст} - T_s)$ составил 40–50°C. По данным работы [7] при кипении воды ($T_я$=20–30°C) перегрев составил порядка 30–40°C. При экспериментах в смеси вода-этанол, содержащих 10% по массе этанола, при схожих условиях ($T_я$=20°C, диаметр нагревателя — 100мкм) перегрев составил 40°C. При насыщенном кипении смеси вода-этанол 96% перегрев жидкости составил 20°C.

При дальнейшем нагреве происходит развитие пузырькового кипения. При этом подсчет показывает, что увеличивается количество активных центров парообразования и частота отрыва паровых пузырьков, а также растет плотность теплового потока.

Пузырьковое кипение — вторая область на кривой нагрева. На этом участке с ростом $T_{ст}$ плотность теплового потока q возрастает до прекращения нагрева. В смеси вода-этанол при 10% по массе этанола нагрев остановили при $T_{ст}$=172°C и плотности теплового потока 5,4 МВт/м^2. Величина q примерно равна 0,4$q_{кр}$ в данной смеси. В смеси вода-этанол при 96% по массе этанола нагрев прекратился при значениях плотности теплового потока близких к критической плотности теплового потока ($T_{ст}$= 94 °C, q = 0,61 МВт/м^2).

После нагрева начинался процесс охлаждения. При уменьшении $T_{ст}$ кипение затухало и переходило в конвекцию. Обратного «скачка» температуры поверхности нагрева от кипения к конвекции не обнаружено. В смеси вода-этанол при 10% по массе этанола кипение прекратилось при $T_{ст}$= 95°C и q = 1,3 МВт/м^2. В смеси вода-этанола при 96% по массе этанола кипение не наблюдалось при $T_{ст}$= 84 °C и q=0,04 МВт/м^2.

На рис. 2 приведены результаты измерения, при котором три раза последовательно получены кривые кипения и охлаждения. Во всех трех случаях кривая нагрева проходит ниже кривой охлаждения. Каждая реализация нагрева и охлаждения в области пузырькового кипения не совпадает друг с другом.

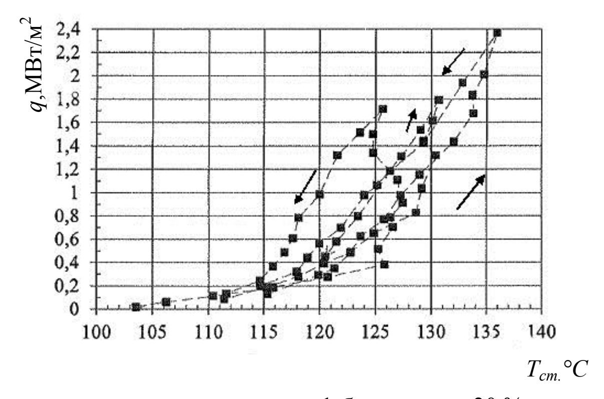
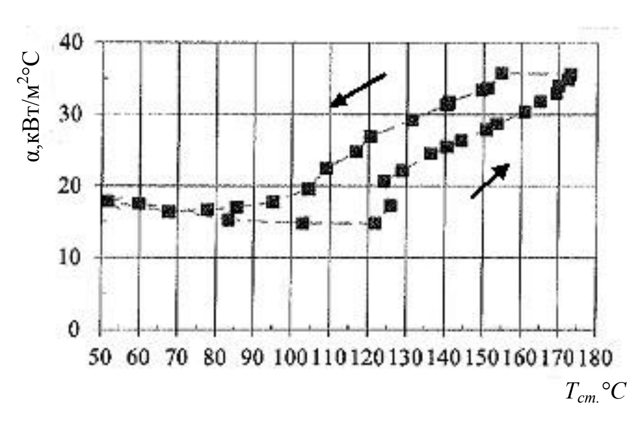


Рис. 2. Гистерезис по тепловому потоку в смеси вода-1-бутанол при 20 % по массе 1-бутанола ($T_я$= 90°C) в области пузырькового кипения

Fig. 2. Hysteresis on heat flux in water-1-butanol mixture at 20 % by butanol mass ($T_я$ = 90 °C) in bubble boiling region

Гистерезис теплоотдачи при кипении жидкостей. Для экспериментов в смеси вода-этанол при 10% по массе этанола и вода-1-бутанол 20% по массе 1-бутанола на рис. 3 приведены зависимости $\alpha(T_{ст})$. Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении мы использовали выражение:

$$\alpha = q/(T_{ст} - T_{я})$$



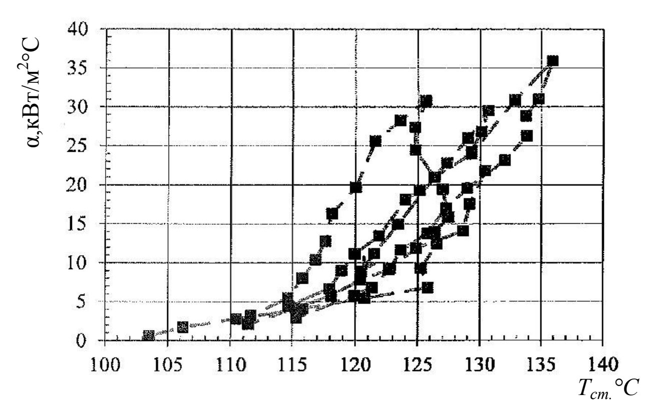


Рис. 3. Гистерезис теплоотдачи в области пузырькового кипения (a — в смеси вода-этанол 10 % по массе этанола ($T_{я}$=20 °C), b — в смеси вода-1-бутанол 20 % по массе бутанола ($T_{я}$=90 °C)

Fig. 3. Heat-transfer hysteresis in bubble boiling region (a — in water-ethanol mixture at 10 % by ethanol mass ($T_{я}$=20 °C), b — in water-1-butanol mixture at 20 % by butanol mass ($T_{я}$ = 90 °C)

На кривой $\alpha(T_{ст})$ обнаруживается гистерезис теплоотдачи. Кривая нагрева проходит всегда ниже, чем кривая охлаждения. Т. е. при заданной температуре нагревателя коэффициент теплоотдачи всегда будет больше при охлаждении, чем при нагреве. Этот факт был замечен как при однократном нагреве и охлаждении, так и при многократных нагревах и охлаждениях.

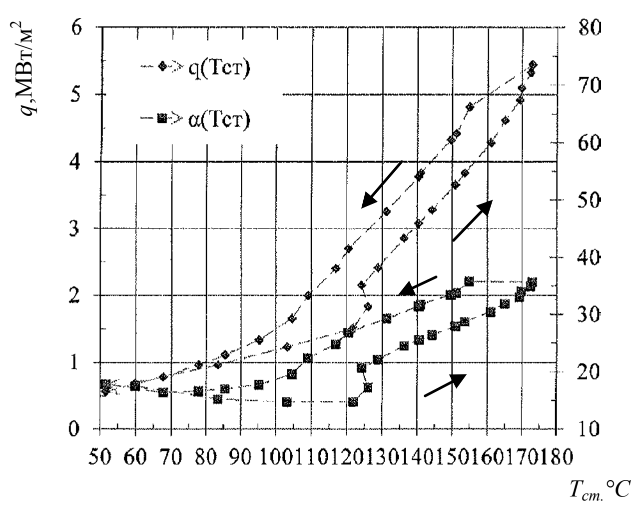


Рис. 4. Кривая кипения в смеси вода-этанол 10 % по массе этанола ($T_{я}$=20°C) в области пузырькового кипения

Fig. 4. Boiling curve in water-ethanol mixture at 10 % ($T_{я}$ = 20 °C) in nucleate boiling region

Кривая кипения. Представим гистерезис по тепловому потоку на кривой кипения. Кривая кипения — это две синхронно полученные в одном эксперименте зависимости $q(T_{ст})$ и $\alpha(T_{ст})$. Такая диаграмма показана на рис. 4.

Разделим кривую кипения на 2 участка. На первом участке в области 50°C $< T_{ст} <$ 85°C гистерезис по тепловому потоку не обнаруживается. Если установить любую $T_{ст}$ на данном участке, то величины коэффициентов теплоотдачи при нагреве и охлаждении будут иметь близкие значения. На втором участке 85°C $< T_{ст} <$ 172°C наблюдается гистерезис по типовому потоку. Причиной гистерезиса по тепловому потоку является разные значения теплоотдачи на кривой нагрева и кривой охлаждения при любой заданной $T_{ст}$.

Выводы.

- Наряду с гистерезисом по тепловому потоку кипящих смесей, впервые обнаружен гистерезис коэффициента теплоотдачи.
- Изученная динамика нагрева при пузырьковом кипении бинарных смесей показывает, что кривая нагрева, как для тепловых потоков, так и для коэффициента теплоотдачи, проходит всегда при более низких значениях этих величин (q и α), чем кривая охлаждения.

Библиографический список

1. Van Wijk, W.R. Heat transfer to boiling liquid mixtures/ W.R. Van Wijk, A. S. Vos, S.J.D. van Stralen// Chem. Eng. Sci, — 1956. — Vol. 5 — P. 68- 80.
2. Lykov, E.V. Thermoacoustick effects in surface boiling liquids/ E.V. Lykov// Int. J. Heat Mass Transfer. — 1972. — Vol. 15. — P. 1603-1614.
3. Романов, В. В. Связь между скоростью испарения и критической плотностью теплового потока кипящих бинарных смесей жидкостей/ В. В. Романов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — №4(65). — С. 56–60.
4. Reddy, R.P. The peak boiling heat flux in saturated ethanol-water mixtures/ R.P. Reddy, J.H. Lienhard //ASME Journal of Heat Transfer - 1989. - Vol. 111. - P, 480 - 486.
5. Ковалев, С. А. Кризис кипения. Две конкурирующие идеи // С. А. Ковалев, С. В. Усатиков / Труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2014. — С. 566–569.
6. Osborne, M.F.M. The acoustical concomitants of cavitation and boiling produced by a hot wire/ M. F. M. Osborne, F.M. Holland// J. Acoust. Soc. Am. — 1954. —Vol. 19(1). —P. 13-29.
7. Лыков, Е. В. Переходные процессы и теплоакустические эффекты при поверхностном кипении жидкости / Е. В. Лыков, А. Г. Синецкая // Инженерно-физический журнал. — 2005. — Т. 78, № 4, — С. 22–26.
8. Кожокару, В. В. Кризис теплоотдачи и критический тепловой поток при нагреве кипящих жидкостей / В. В. Кожокару, Е. В. Лыков // Авиакосмические технологии (АКТ-2015): Труды XVI Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. — Воронеж, 2015. —С.148–153.
9. Кожокару, В. В. Исследование критической плотности теплового потока при квазистационарном нагреве поверхностно кипящих бинарных смесей / В. В. Кожокару, В. В. Лыков// Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — №1(80). — С.48–53.
10. Афанасьев, С. Ю. Исследование теплообмена при недогретом пузырьковом кипении в условиях стабилизации температуры проволочного нагревателя / С. Ю. Афанасьев, С. А. Жуков, С. Б. Ечмаев // Теплофизика высоких температур. — 1996. — Т. 34, №4. —С. 583–589.

References

1. Van Wijk, W.R., Vos, A.S., van Stralen, S.J.D. Heat transfer to boiling liquid mixtures. Chem. Eng. Sci, 1956, vol. 5, pp. 68- 80.
2. Lykov, E.V. Thermoacoustick effects in surface boiling liquids. Int. J. Heat Mass Transfer,1972, vol. 15, pp. 1603-1614.
3. Romanov, V.V. Svyaz' mezhdu skorost'yu ispareniya i kriticheskoy plotnost'yu teplovogo potoka kipyashchikh binarnykh smesey zhidkostey. [Interconnection between evaporation rate and critical density of heat flow of boiling binary liquid mixtures.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 4(65), pp. 56–60 (in Russian).
4. Reddy, R.P., Lienhard , J.H. The peak boiling heat flux in saturated ethanol-water mixtures. ASME Journal of Heat Transfer, 1989, vol. 111, pp. 480 - 486.
5. Kovalev, S.A., Usatikov, S.V. Krizis kipeniya. Dve konkuriruyushchie idei. [Boiling crisis. Two competing ideas.] Trudy shestoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. [Proc. Sixth Russian National Conf. on Heat Transfer.] Moscow: MAI Publ. House, 2014, pp. 566–569 (in Russian).
6. Osborne, M.F.M., Holland, F.M. The acoustical concomitants of cavitation and boiling produced by a hot wire. J. Acoust. Soc. Am., 1954, vol. 19(1), pp. 13-29.
7. Lykov, E.V., Sinetskaya, A.G. Perekhodnye protsessy i teploakusticheskie effekty pri poverkhnostnom kipenii zhidkosti. [Transient processes and Thermoacoustic effects in surface boiling of a liquid.] Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2005, vol. 78, no. 4, pp. 22–26 (in Russian).

8. Kozhokaru, V.V., Lykov, E.V. Krizis teplootdachi i kriticheskiy teplovoy potok pri nagreve kipyashchikh zhidkostey. [Heat transfer crisis and critical heat flux under heating of boiling liquids.] Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2015): Trudy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. [Aerospace Technologies (ACT-2015): Proc. XVI All-Russian Sci.-Tech. Conf. and School of Young Scientists, Post-Graduate Students and Students.] Voronezh, 2015, pp.148–153 (in Russian).

9. Kozhokaru, V.V., Lykov, E.V. Issledovanie kriticheskoy plotnosti teplovogo potoka pri kvazistatsionarnom nagreve poverkhnostno kipyashchikh binarnykh smesey. [Study on critical heat flux density at the quasi-stationary heating of superficially boiling binary mixtures.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 1(80), pp. 48–53 (in Russian).

10. Afanasyev, S.Y., Zhukov, S.A., Yechmaev, S.B. Issledovanie teploobmena pri nedogretom pu¬zyr'kovom kipenii v usloviyakh stabilizatsii temperatury provolochnogo nagrevatelya. [Study on heat transfer in case of subcooled nucleate boiling under conditions of temperature stabilization of wire heater.] High Temperature, 1996, vol. 34, no. 4, pp. 583–589 (in Russian).

Поступила в редакцию 17.12.2017
Сдана в редакцию 18.12.2017
Запланирована в номер 15.03.2018

Received 17.03.2017
Submitted 18.12.2017
Scheduled in the issue 15.03.2018

Об авторах:

Кожокару Виктор Владимирович,
главный инженер проекта Южного проектного института (РФ,344082, г. Ростов-на-Дону, ул. М. Горького 11/43),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7220-4107
kogokary@rambler.ru

Лыков Евгений Васильевич,
профессор кафедры «Теплоэнергетика и прикладная гидромеханика» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор физико-математических наук, профессор
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7812-8624
elykov@mail.ru

Желонкина Елена Сергеевна,
аспирантка кафедры «Теплоэнергетика и прикладная гидромеханика» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2931-1385
elena-simonenko@indox.ru

Authors:

Kozhokaru, Victor V.,
chief project engineer, South Project Institute (RF, 344082, Rostov-on-Don, M. Gorky St., 11/43),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7220-4107
kogokary@rambler.ru

Lykov, Evgeny V.,
professor of the Heat Power Engineering and Applied Hydromechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7812-8624
elykov@mail.ru

Zhelonkina, Elena S.,
postgraduate of the Heat Power Engineering and Applied Hydromechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2931-1385
elena-simonenko@indox.ru

Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2, с. 163–170
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 163–170

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 622.23.051 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-163-170

Обоснование выбора упругого элемента для адаптивного режущего долота*

В. С. Исаков[1], Нгуен Зуй Тхань [2]**
[1,2]Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

Rationale for choosing elastic element for adaptive cutting bit***

V. S. Isakov[1], Nguyen Duy Thanh[2]**
[1,2]Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Введение. Проблемам адаптивного бурения посвящено множество работ. Большой интерес представляет не только регулирование режимных параметров органов буровых станков в зависимости от физико-механических свойств породы в забое, но и использование адаптации режущего долота с полным или частичным изменением его структуры за счет введения упругих элементов. Целью настоящей работы является обоснование выбора упругого элемента для адаптивного режущего долота, а также определение его параметров.
Материалы и методы. Авторами проведены экспериментальные исследования на режущем адаптивном долоте диаметром 160 мм с различными параметрами резиновых образцов. В качестве объекта исследований были использованы резиновые образцы, имеющие следующие варьируемые показатели: твердость резины (по Шору) — от 40 до 75 ед.; высота образца — от 25 до 60 мм; рабочий диапазон усилий сжатия — от 5 кН до 30 кН; формы образцов — параллелепипед сплошной, параллелепипед с боковыми проточками, параллелепипед с внутренними отверстиями, параллелепипед слоистый с толщиной слоя от 6 до 15 мм. На основании результатов проведенных экспериментов выполнено сравнение и обоснование выбора наиболее приемлемого типа и параметров упругого элемента.
Результаты исследования. Представлены результаты экспериментальных исследований упругих элементов адаптивных буровых режущих долот. В результате сравнения наиболее распространенных форм амортизаторов установлено, что многослойный элемент наилучшим образом выполняет роль адаптирующей связи.
Обсуждение и заключения. В результате исследований установлено, что в адаптивных буровых инструментах в качестве упругого элемента при малых диаметрах долот целесообразно применение резиновых эластомеров. Сформулированы рекомендации по твердости резины,

Introduction. Problems of the adaptive drilling are currently discussed in a number of works. They are largely devoted to the regulation of standard parameters of the borer tools (depending upon the rock physical and mechanical properties at the mine face), and to implementing drill bit adaptation with complete or partial rearrangement of its structure accomplished through introduction of elastic elements. The paper objective is rationale for choosing an elastic element for an adaptive cutting bit, and its parametrization.
Materials and Methods. Experimental research was carried out using a real adaptive cutting bit (dia. 160 mm) with rubber samples having various parameters. For testing, rubber samples with the following varied properties were selected: rubber hardness (Shore scale) - 40 to 75 ea; sample height - 25 to 60 mm; operating range of pressure load - 5 to 30 kN; sample shapes - solid parallelepiped, parallelepiped with lateral grooves, perforated parallelepiped, layered parallelepiped with layers ranging from 6 to 15 mm. Based on the experimental results, a comparison was carried out with validation of the most suitable elastic element type and its parameters.
Research Results. Findings of the experimental study on elastic elements for adaptive cutting bits are presented. Following the comparison of the most common shapes of shock dampers, it is established that a multi-layered element serves best as an adapting joint.
Discussion and Conclusions. Using rubber-based elastomers as elastic elements in adaptive cutting bits appears to be feasible for low diameter cutters. Recommendations are provided regarding rubber hardness, layer thickness, and total

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail:kafedra_sdkm@mail.ru, nguyenduythanh2211@gmail.com
***The research is done within the frame of the independent R&D.

толщине слоев, общей высоте упругого элемента для заданных значений хода подвижной лопасти адаптивного долота.

Ключевые слова: бурение, перемежающиеся по крепости породы, упругий элемент, режущие долота, адаптивные структуры

Образец для цитирования: Исаков, В. С. Обоснование выбора упругого элемента для адаптивного режущего долота / В. С. Исаков, З. Т. Нгуен // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 2. — С.163–170. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-163-170

height of the elastic element for the specified stroke length values of the adaptive drilling bit blade.

Keywords: drilling, rocks interstratified in hardness, elastic element, cutting bits, adaptive structures.

For citation: V. S. Isakov, Nguyen Duy Thanh. Rationale for choosing elastic element for adaptive cutting bit. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 163–170. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-163-170

Введение. Эффективная работа буровых установок в сложных горно-геологических условиях во многом зависит от правильного выбора бурового инструмента. Однако, если рассматривать вопрос об эффективности бурения с системных позиций, то вариативность условий работы обуславливает оптимизацию характеристик привода машины и ее конструктивных параметров, системы удаления буровой мелочи, бурового инструмента.

В общем случае задача может быть решена за счет создания универсального, сменного или адаптирующегося оборудования. Универсальное оборудование предполагает удовлетворительную работу на породах различной крепости. При этом максимально возможная производительность может достигаться только на породах с определенными характеристиками. В остальных случаях эффективность бурения существенно снижается. Сменное оборудование и регулируемые характеристики буровой машины позволяют достичь максимальной производительности на породах с определенным диапазоном крепости и с различными физико-механическими характеристиками. Однако время, необходимое для поднятия и замены оборудования увеличивает общую продолжительность цикла и, как следствие, снижает производительность станка.

Адаптация предполагает автоматическое приспосабливание оборудования к изменяющимся горно-геологическим условиям и оптимизацию процесса бурения по адаптируемым параметрам. Адаптивное регулирование скорости вращения, подачи, характеристик бурового инструмента, изменение его структуры или его автоматическая замена позволяют достичь максимальной производительности при любых изменениях горно-геологических условий.

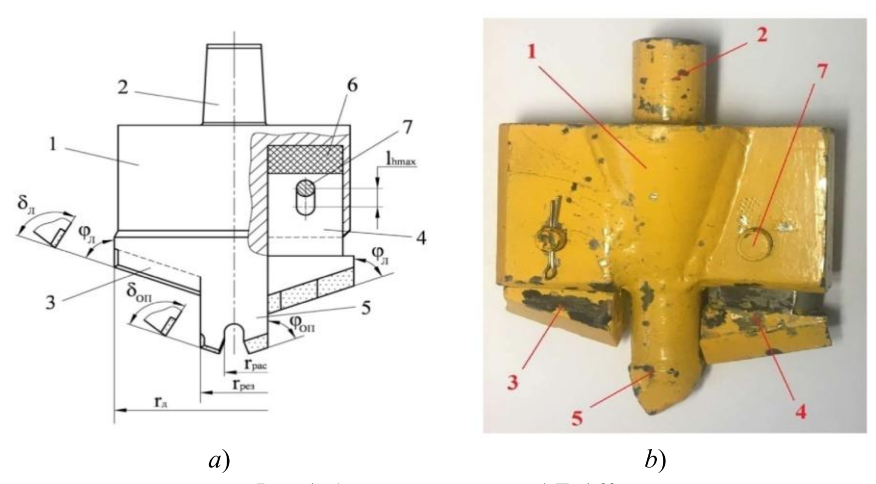
Проблемам адаптивного бурения посвящен ряд работ [1–3]. Как правило, исследования в данной области направлены на регулирование режимных параметров в зависимости от физико-механических свойств породы в забое, на установление взаимосвязи «между усилием подачи и резания, когда энергия, подводимая к резцу, самораспределяется между этими составляющими» [4]. Некоторые работы посвящены адаптации инструмента с полным или частичным [5, 6] изменением его структуры или отдельных элементов.

Возможности конструктивной реализации полного замещения инструмента (комбинированные долота) ограничены диаметром долот и способом удаления буровой мелочи. В этой связи для долот малых диаметров более перспективным представляется частичное изменение структуры и конструктивных параметров инструмента за счет введения упругих элементов [5, 7]. Учитывая условия работы инструмента, преимущественное применение получили упругие элементы, выполненные из резины.

Экспериментальное исследование и анализ его результатов. Современные резины и эластомеры способны сохранять свои свойства в широком диапазоне температур — от –60 до +250 °С, обладают абразиво- и износостойкостью, стойкостью к динамическим нагрузкам, агрессивным средам, способностью поглощать вибрацию и т. д. Данная совокупность свойств позволяет не только использовать их в качестве амортизаторов [8], улучшающих работу буровой установки, но и в качестве адаптирующих элементов, изменяющих структуру и параметры инструмента в зависимости от условий среды.

Конструкции, предложенные в [9, 10], предполагают сжатие упругого элемента в ограниченном пространстве и необходимость обеспечить заданную функцию перемещения режущего элемента в зависимости от сопротивления разрушаемой породы.

Экспериментальные исследования были проведены на реальном режущем адаптивном долоте с диаметром 160 мм (АД–160), где одна из лопастей выполнена подвижной, что проиллюстрировано с помощью конструктивной схемы на рис. 1, *a* и фотографии — рис. 1, *b*.



a) *b*)

Рис. 1. Адаптивное долото АД–160
a) конструктивная схема АД–160; *b*) фотография АД–160; 1 — корпус АД; 2 — хвостовик; 3 — неподвижная лопасть; 4 — подвижная лопасть; 5 — опережающий забурник; 6 — упругий элемент; 7 — стопорный болт

Fig. 1. Adaptive bit AD-160, a) construction scheme of AD-160; b) photo of AD-160
1 – adaptive bit body; 2 – shank; 3 – fixed blade; 4 –movable blade; 5 – starting borer; 6 – elastic element; 7 – retaining bolt

Для сравнения сжатие образца проводилось также в сводном состоянии. Варьируемые показатели: твердость резины (по Шору) — от 40 до 75 ед.; высота образца — от 25 до 60 мм; рабочий диапазон усилий сжатия — от 5 кН до 30 кН; формы образцов — параллелепипед сплошной, параллелепипед с боковыми проточками, параллелепипед с внутренними отверстиями, параллелепипед слоистый с толщиной слоя от 6 до 15 мм. Геометрические размеры образцов были ограничены прочностными параметрами корпуса долота, т. е. обусловлены конструктивными соображениями. Диапазон варьирования усилия сжатия соответствовал диапазону усилий подачи бурового инструмента при крепости породы до шести по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Формы образцов соответствовали наиболее распространенным амортизаторам, рекомендуемым в литературе [8, 11]. При этом соблюдались ограничения: подвижный режущий элемент при максимальной нагрузке погрузился в корпус долота до специального упора. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки: 1 — механический пресс; 2 — динамометр; 3 — индикатор перемещения; 4 — опытный образец долота АД–160; 5 — специальный индентор

Fig. 2. General configuration of pilot plant 1 – mechanical press; 2 – dynamometer; 3 – travel dial indicator; 4 – prototype model of bit AD-160; 5 – custom indenter

Установка позволяет измерять варьируемые параметры в вышеназванных диапазонах с точностью: для осадки образца ±0,1 мм; для усилия сжатия ±10 Н. Твердость образцов по Шору определялась твердомером ТМ–2.

На рис. 3 представлены зависимости осадки образцов от усилия сжатия при свободном деформировании и сжатии в обойме долота. При деформации резиновый образец упирается в стенки обоймы, заполняет все свободное пространство и сопротивление сжатию резко увеличивается. При увеличении высоты образца объем «свободного» пространства заполняется при относительно меньших нагрузках и экспоненциальное возрастание сопротивлению происходит при большей осадке. Так, например, в образцах параллелепипеда сплошного размера основания 40x18 мм с высотой 45 и 25 мм возрастание сопротивления образов происходит от 10 мм и 4 мм соответственно. При этом деформации сжатия составляет 33,8 % и 38,8 % соответственно. На рис. 4 представлено изменение относительной деформации в зависимости от усилия сжатия.

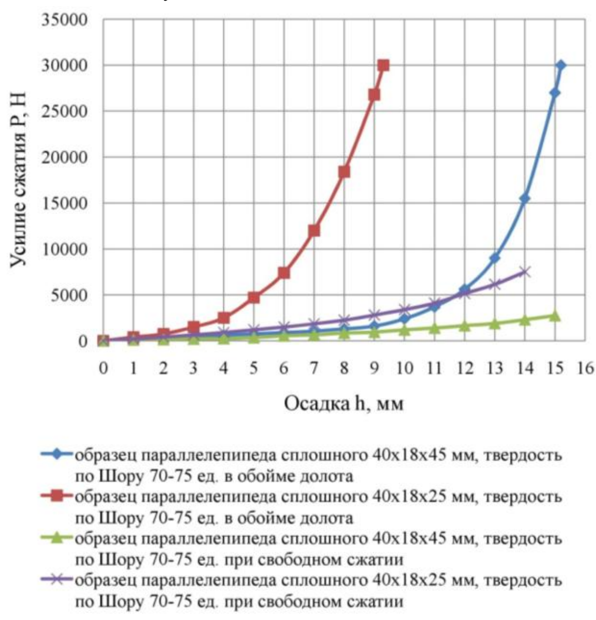


Рис. 3. Зависимость осадки от усилия сжатия

Fig. 3. Dependence of subsidence on forward pressure

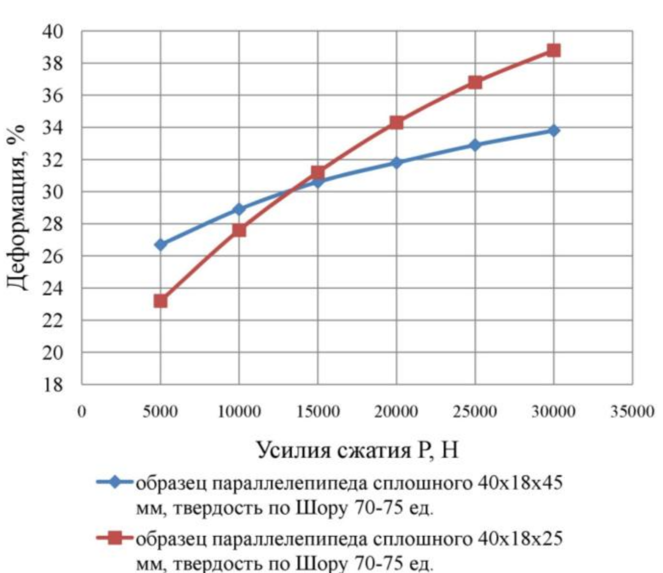


Рис. 4. Изменение относительной деформации от усилия сжатия

Fig. 4. Change in rate of strain on forward pressure

Таким образом, в диапазоне нагрузок от 5 кН до 30 кН величина перемещений подвижной лопасти будет снижаться. В случае мягких резин (40–45 ед. по Шору) заполнение свободного пространства происходит при

меньших нагрузках по сравнению с резинами твердостью 70–75 ед. по Шору (рис. 5). Как видно из графиков, возможное перемещение подвижного лезвия при твердости 40–45 ед. по Шору составило 2,2 мм, при твердости 70–75 ед. — 4,1 мм, при твердости 60–65 ед. — 3,9 мм, что позволяет отдать предпочтение резинам с твердостью 60–65 ед. и 70–75 ед. по Шору.

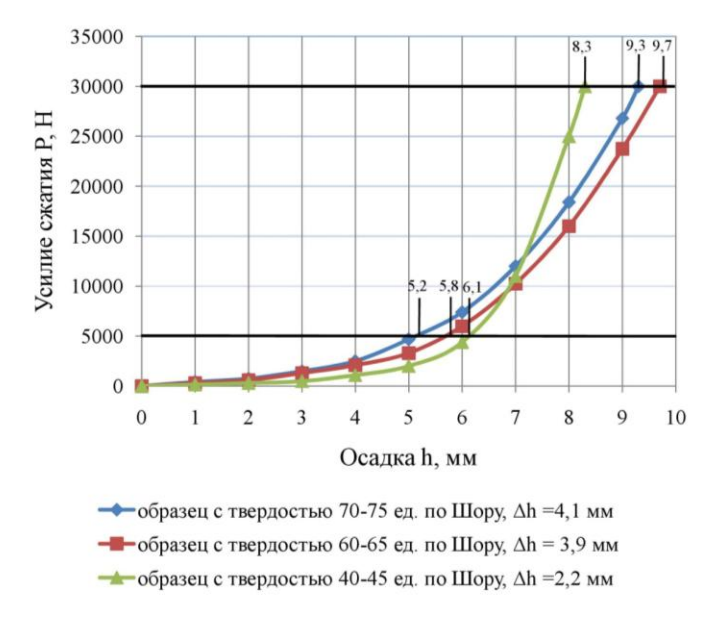


Рис. 5. Зависимость деформации образцов сплошного параллелепипеда
с размерами 40x18x25 мм от твердости резины

Fig. 5. Dependence of deformation of solid parallelepiped patterns of 40x18x25 mm on hardness

Как показали испытания резиновых вставок с боковыми проточками, осадка увеличивается в зоне до 5,0 кН. Увеличивается осадка при нагрузке 30 кН, однако возможное перемещение подвижного лезвия уменьшается. Сводные данные по испытаниям приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний осадки резины

Test results of rubber upsetting

Вид образца резины	Начальная высота образца h_0, мм	Осадка образца резины h, мм при усилии сжатия $P, кН$		Разность осадки резины Δh, мм
		$P = 5\ кН$	$P = 30\ кН$	
С боковыми проточками	45	14,3	17,2	2,9
	40	11,5	14,2	2,7
С цилиндр. отверстиями	40	11,2	13,2	2,0
	30	8,0	11,3	3,3
Сплошные образцы	45	11,7	15,2	3,5
	40	9,7	13,6	3,9
	30	6,8	10,6	3,8

Аналогичные результаты экспериментов получены на образцах с круглыми цилиндрическими отверстиями: Δh снижается до 2,0 мм (для образцов с боковыми проточками — 2,7 мм и сплошным образцом —

3,9 мм). Таким образом, для данного случая эксперименты показывают нецелесообразность использования амортизаторов с проточками и внутренними отверстиями.

Многослойные образцы с металлическими прослойками показали наилучшие результаты. Толщина каждого пласта для экспериментов была выбрана 6, 8, 10 мм, количество слоев — 3, 4, 5, 6.

На рис. 6 представлены результаты испытаний образцов с количеством слоев и толщиной пласта: 3х10 мм; 4х10 мм; 5х10 мм. Дальнейшее увеличение нецелесообразно по геометрическим параметрам долота. Образцы с более тонкими слоями резины показали меньшую величину разности осадки. Для сравнения на рис. 6 представлены результаты испытания образцов 6х6 мм; 5х8 мм, показавшие максимальную разность осадки.

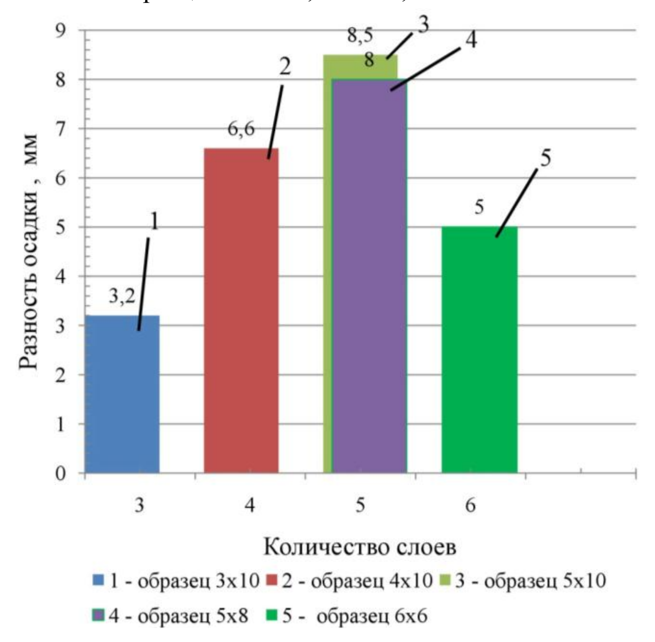


Рис. 6. Результаты испытаний многослойных образцов с металлическими прослойками

Fig.6. Test results of multi-layered samples with metal inserts

Выводы. В адаптивных буровых инструментах в качестве упругого элемента при малых диаметрах долот целесообразно применение резиновых эластомеров, обладающих высокой эластичностью, абразиво- и износостойкостью, стойкостью к динамическими нагрузкам, агрессивным средам и пыли, достаточным температурным интервалом при сохранении эластичных свойств. Проведенные авторами экспериментальные исследования показали, что для данных условий работы наиболее приемлемы резины с твердостью 60–65 ед. и 70–75 ед. по Шору. Применение наиболее распространенных форм, применяемых в амортизаторах (с боковыми проточками, с внутренними отверстиями) повышает величину осадки образцов в диапазоне нагрузки от 0 до 5 кН и не приводит к существенному изменению осадки в диапазоне нагрузки 5 до 30 кН, по сравнению со сплошными образцами. Наиболее перспективными являются упругие элементы, выполненные в виде многослойной конструкции с толщиной слоя 8–10 мм и прослойками из металла толщиной 0,5–1,0 мм. Они обеспечивают достаточную по величине осадку резинового элемента в диапазоне нагрузок от 5 кН до 30 кН, что может обеспечить заданной ход подвижной лопасти адаптивного долота.

Библиографический список

1. Дровников, А. Н. Структурная схема динамической модели «адаптивный буровой станок — забой» / А. Н. Дровников, М. А. Лемешко // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 8. — С. 147–149.

2. Шигин, А. О. Проектирование адаптивных рабочих органов буровых станков для сложноструктурных горных массивов / А. О. Шигин. — Красноярск : изд-во СФУ, 2013. — 155 с.

3. Пономарев, А. Я. Адаптивные буровые агрегаты с электромеханическим приводом / А. Я. Пономарев, А. А. Мясников // Вестник Кыргызско-Российского славянск. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 1. — С. 84–87.

4. Лемешко, М. А. Метод адаптивного процесса резания горных пород / М. А. Лемешко, Р. Ю. Волков // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2014. — № 5. — С. 46–50.

5. Катанов, Б. А. Режущие буровые коронки с упругими элементами / Б. А. Катанов, М. И. Протасов, А. Г. Пимаков // Горное оборудование. — 1977. — № 2. — С. 20–24.

6. Дойников, Ю. А. Разработка параметрического ряда буровых долот режущего и комбинированного типов / Ю. А. Дойников, А. Е. Беляев, Н. Н. Страбыкин // Горное оборудование и электромеханика. — 2010. — № 1. — С. 37–41.

7. Исаков, В. С. Обоснование адаптируемых параметров режущего бурового инструмента / В. С. Исаков, Нгуен Зуй Тхань, Н. П. Чухряев // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2016. — № 1. — С. 76–79.

8. Потураев, В. Н. Резина в горном деле / В. Н. Потураев, В. И. Дырда, В. П. Надутый. — Москва : Недра, 1974. — 150 с.

9. Долото для вращательного бурения : патент 162328U1 Рос. Федерация : Н. П. Чухряев, В. С. Исаков, Нгуен Зуй Тхань. — № 2016101337/03 ; заявл. 18.01.16 ; опубл. 10.06.16, Бюл. № 16 — 3 с.

10. Буровое режущее долото : патент 2300621 Рос. Федерация : Н. П. Чухряев, В. С. Исаков [и др.]. — № 2005121113; заявл. 05.07.05; опубл. 10.09.07, Бюл. № 16. — 3 с.

11. Резина — конструкционный материал современного машиностроения / П. Ф Баденков и [др.]. — Москва : Химия, 1967. — 232 с.

References

1. Drovnikov, A.N., Lemeshko, M.A. Strukturnaya skhema dinamicheskoy modeli «adaptivnyy burovoy stanok — zaboy». [Structural diagram of dynamic model “adaptive drillrig – face”.] Mining Iinformational and Analytical Bulletin, 2003, no. 8, pp. 147–149 (in Russian).

2. Shigin, A.O. Proektirovanie adaptivnykh rabochikh organov burovykh stankov dlya slozhnostrukturnykh gornykh massivov. [Design of adaptive working elements of drillrigs for complex structural mountain groups.] Krasnoyarsk: SFU Publ. House, 2013, 155 p. (in Russian).

3. Ponomarev, A.Y., Myasnikov, A.A. Adaptivnye burovye agregaty s elektromekhanicheskim privodom. [Adaptive drill units with the electromechanical drive.] Vestnik KRSU, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 84–87 (in Russian).

4. Lemeshko, M.A., Volkov, R.Y. Metod adaptivnogo protsessa rezaniya gornykh porod. [Method of adaptive process of cutting rocks.] Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk, 2014, no. 9, pp. 46–50 (in Russian).

5. Katanov, B.A., Protasov, M.I., Pimakov, A.G. Rezhushchie burovye koronki s uprugimi elementami. [Cutting drill bits with elastic elements.] Gornoe oborudovanie, 1977, no. 2, pp. 20–24 (in Russian).

6. Doinikov, Yu.A., Belyaev, A.E., Strabikin, N.N. Razrabotka parametricheskogo ryada burovykh dolot rezhushchego i kombinirovannogo tipov. [Development of a parametric series of cutting and combined equipment.] Mining Equipment and Electromechanics, 2010, no. 1, pp. 37–41 (in Russian).

7. Isakov, V.S., Nguyen Duy Thanh, Chukhryaev, N.P. Obosnovanie adaptiruemykh parametrov rezhushchego burovogo instrumenta. [Justification of adaptable parameters of the cutting drilling tool.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2016, no. 1, pp. 76–79 (in Russian).

8. Poturaev, V.N., Dyrda, V.I., Naduty, V.P. Rezina v gornom dele. [Rubber in mining.] Moscow: Nedra, 1974, 150 p. (in Russian).

9. Chukhryaev, N.P., Isakov, V.S., Nguyen Duy Thanh. Doloto dlya vrashchatel'nogo bureniya: patent 162328U1 Ros. Federatsiya. [A bit for rotary drilling.] Patent RF, no. 162328U1, 2016 (in Russian).

10. Chukhryaev, N.P., Isakov, V.S., et al. Burovoe rezhushchee doloto: patent 2300621 Ros. Federatsiya. [Drilling cutting bit.] Patent RF, no. 2300621, 2007 (in Russian).

11. Badenkov, P.F., et al. Rezina — konstruktsionnyy material sovremennogo mashinostroeniya. [Rubber – a structural material of modern engineering.] Moscow: Khimiya, 1967, 232 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.03.2018
Сдана в редакцию 14.03.2018
Запланирована в номер 15.04.2018

Received 14.03.2018
Submitted 14.03.2018
Scheduled in the issue 15.04.2018

Об авторах:

Исаков Владимир Семенович,
профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (РФ, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132),
доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1859-6589
kafedra_sdkm@mail.ru

Нгуен Зуй Тхань,
аспирант кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (РФ, Ростовской области, г.Новочеркасск, ул.Просвещения, 132),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7979-084X
nguyenduythanh2211@gmail.com

Authors:

Isakov, Vladimir S.,
professor of the Automobiles and Transport and technological Complexes Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (RF, 346428, Rostov Region, Novocherkassk, ul. Prosveshcheniya, 132),
Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1859-6589
kafedra_sdkm@mail.ru

Nguyen Duy Thanh,
postgraduate student of the Automobiles and Transport and technological Complexes Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (RF, 346428, Rostov Region, Novocherkassk, ul. Prosveshcheniya, 132),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7979-084X
nguyenduythanh2211@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.363.28. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-171-178

Процесс формирования компактов*

Ю. В. Подкользин[1], Л. М. Авласенко[2], И. М. Пешхоев[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Compacts formation process***

Yu. V. Podkolzin[1], L. M. Avlasenko[2], I. M. Peshkhoev[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Биомасса используется в качестве продовольствия, для приготовления кормов, получения энергии. Это дисперсный материал, характеризуемый высокой пористостью и низкой плотностью, что вызывает неудобства в его использовании. Поэтому для улучшения технологических свойств биомассу подвергают уплотнению с приданием определенной формы компактам (брикетам, гранулам и др.).
Материалы и методы. Рассматривается процесс уплотнения биомассы в компакты. Показано, что сопротивление дисперсных материалов уплотнению, к которым относится и биомасса, определяется структурно-механическими свойствами уплотняемого материала — структурной прочностью, внутренним трением, давлением связности, прочностью частиц материала и прочностью связей между частицами. Теоретическими исследованиями определены взаимосвязи между всеми характеристиками сухой биомассы, которые легли в основу методики расчета машин для формирования биомассы в компакты.
Результаты исследования. Разработана методика, позволяющая определять основные параметры пресса с кольцевыми матрицами исходя из предъявляемых к компактам требований и структурно-механических свойств уплотняемого материала. Методика рекомендуется для проектирования машин, обеспечивающих формирование биомассы в компакты с заданными свойствами
Обсуждение и заключения. Полученные закономерности могут быть использованы при проектировании прессов для производства компактов с заданными свойствами.

Introduction. Biomass is used as foodstuff, for feed making, and for energy production. This is a dispersed material characterized by high porosity and low density, which is poorly adapted for use. Therefore, to improve its processability, biomass is subjected to compaction to shape compacts (feed wafers, granules, etc.).
Materials and Methods. The process of packing biomass in compacts is considered. It is shown that the resistance of dispersed materials to compaction, which includes biomass, is determined by the structural and mechanical properties of the material compacted – structural strength, internal friction, connectivity pressure, strength of the material particles, and bond strength between particles. Theoretical studies have determined the relationships between all the characteristics of dry biomass which form the basis for calculating machines for shaping biomass in compacts.
Research Results. A technique is developed that allows determining the critical parameters of the press with ring dies due to the requirements for the compacts and structural and mechanical properties of the material compacted. The technique is recommended for designing machines providing the formation of biomass in compacts with specified properties.
Discussion and Conclusions. The obtained patterns can be used under designing presses for the production of tailored compacts.

Ключевые слова: уплотнение, компактирование, биомасса, матрица, пресс с кольцевой матрицей.

Keywords: compaction, biomass, matrix, press with ring dies.

Образец для цитирования: Подкользин, Ю. В. Процесс формирования компактов / Ю. В. Подкользин, Л. М. Авласенко, И. М. Пешхоев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, №2. — С.171–178. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-171-178

For citation: Yu. V. Podkolzin, L. M. Avlasenko, I. M. Peshkhoev. Compacts formation process. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 171–178. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-171-178

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: podkol45@yandex.ru, Avlas333@mail.ru peshkhoev@rambler.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Биомасса — это все возобновляемые за короткое время органические материалы. Биомасса используется в качестве продовольствия, для приготовления кормов, получения энергии. Биомасса относится к дисперсным материалам, характеризуемым высокой пористостью, т.е. низкой плотностью, что вызывает неудобства в ее использовании. Поэтому для улучшения технологических свойств ее подвергают уплотнению, с приданием определенной формы компактам (брикетам, гранулам и др.). Помимо повышения транспортабельности, обеспечиваемой за счет уплотнения биомассы, обеспечивается получение и других полезных свойств. Например, гранулирование комбикормов обеспечивает сохранность рецептуры кормов при хранении и скармливании животным, повышение питательности кормов и увеличение их скармливаемости (на 20% больше, чем рассыпных). Использование биомассы в виде компактов из опилок обеспечивает улучшение экологии за счет сокращения площади свалок, позволяет получать новый продукт — топливные гранулы, которые могут являться заменителями угля, причем без нанесения ущерба окружающей среде.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета пресса-гранулятора с кольцевой матрицей, учитывающей весь комплекс факторов, действующих при работе этой машины.

Материалы и методы. Расширение производства компактов из биомассы вызвало значительный интерес к созданию конструкций машин для производства компактов. В трудах [1–5] разработаны методики определения отдельных параметров этих машин, но целостная методика расчета их конструктивных и технологических параметров пока не создана. Это не гарантирует эффективность использования новых машин при производстве компактов из различных видов биомассы. Поэтому предпринята попытка разработки методики, учитывающей весь комплекс факторов, действующих при работе машин. При анализе технологического процесса использовались методы, разработанные в механике грунтов [6], теории обработки материалов давлением [7], сельскохозяйственном машиностроении [1, 8].

Результаты исследования. Для получения гранул в основном применяются прессы с кольцевыми матрицами, обеспечивающие непрерывность процесса формирования. В процессе уплотнения происходит изменение состояния дисперсного материала — из рассыпного он превращается в монолитное тело, обладающее новыми характеристиками. Под действием внешнего давления p происходит изменение плотности дисперсного материала ρ и его структурно-механических свойств — внутреннего и внешнего трения, коэффициента бокового давления $\xi = dq/dp$, сцепления τ_0, структурной прочности:

$$p_{стр} = 2\,\tau_0 \cos\ /\left(1-\sin\varphi\ \right)$$

где φ — угол внутреннего трения материала.

Структурная прочность — это прочность внутренних связей между частицами дисперсного тела. Деформации до преодоления структурной прочности незначительны и обратимы. При нагрузке, превышающей структурную прочность, связи между частицами нарушаются, они перемещаются относительно друг друга и начинается уплотнение. При этом на стенки камеры прессования начинает действовать боковое давление.

Боковое давление на стенки камеры прессования при уплотнении материала возникает не сразу, а только после достижения давлением p величины, равной структурной прочности материала

$$q = \xi(p - p_{стр}).$$

То есть боковое давление при уплотнении определяется только частью внешнего давления p, превышающего структурную прочность материала при сжатии.

График изменения бокового давления от осевого при уплотнении и разгрузке показан на рис.1. Экспериментальная зависимость при нагружении представлена пунктирной линией. Криволинейный характер зависимости свидетельствует о том, что при уплотнении материала его свойства непрерывно меняются. Касательная, проведенная к кривой в точке максимального нагружения, наклонена к оси абсцисс под углом, тангенс которого равен коэффициенту бокового давления при максимальном нагружении и отсекает на оси абсцисс отрезок, равный структурной прочности материала $p_{стр}$. При дальнейшей разгрузке и повторном приложении нагрузки значения этих показателей сохраняются.

Если при нагружении внутреннее трение препятствует деформации, и, следовательно, уменьшает боковое давление, передаваемое на стенки камеры уплотнения, то при разгрузке внутреннее трение препятствует расширению уплотненного материала. Поэтому уменьшение давления p не ведет к уменьшению бокового давления до тех пор, пока касательные напряжения не уменьшатся на величину, равную величине напряжений начального сдвига $\Delta\tau = \tau_н$.

С учетом изменения знака касательных напряжений, зависимость бокового давления q от внешнего p для второго этапа разгрузки имеет вид:

$$q = \xi\left(p + p_{стр}\right) = \xi\, p + q_0$$

где $q_о = \xi p_{стр}$ — остаточное боковое давление.

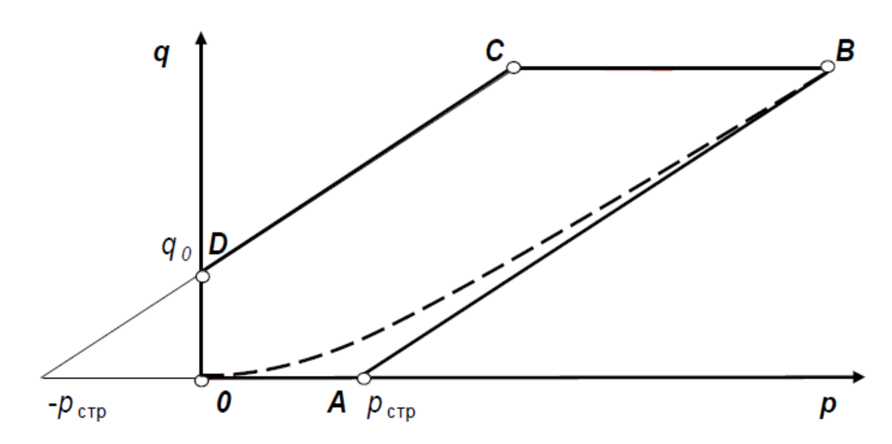


Рис.1. Зависимость бокового давления *q* от осевого *p* при уплотнении
(экспериментальная зависимость: начальное нагружение *0В*,
теоретическая зависимость — линия *0АВ*, разгрузка — линия *ВCD*)

Fig.1. Dependence of lateral pressure q on axial p under compaction
(observed dependence: initial loading OB, theoretical dependence – line OAB, unloading – line BCD)

При разгрузке боковое давление не изменяется до тех пор, пока внешнее давление не уменьшится на величину $2p_{стр}$ от начального значения. Затем боковое давление понижается до значения остаточного бокового давления.

Уравнение, связывающее приложенное давление и плотность (или пористость) уплотняемого материала, названо Мельниковым С. В. «основным уравнением прессования» [9].

Многочисленными исследователями предложены различные математические зависимости для описания этого процесса. Особов В. И., проанализировав работы предшествующих исследователей, установил, что все раннее полученные зависимости имеют недостатки и высказал гипотезу о закономерности процесса сжатия сено-соломистых материалов [1]. На основе этой гипотезы теоретически получено уравнение, связывающее плотность уплотненного материала с давлением, необходимым для получения этой плотности:

$$p = C(e^{a(\rho-\rho_0)} - 1) \qquad (1)$$

где ρ_0 — начальная плотность материала; *С, а* — эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты *С* и *а* в формуле (1) не имеют четкого физического смысла [9], что приводит при пользовании этой формулой к ошибкам и неверным выводам. Например, Яговкин П. В. делает заключение, что чем выше начальная плотность материала, тем меньшее давление необходимо для его уплотнения до одинаковой плотности [10]. Однако, как свидетельствует опыт, для достижения одной и той же плотности компакта, независимо от начальной плотности уплотняемого материала, к нему необходимо приложить одно и тоже давление. Кроме того, из формулы следует, что при изменении давления на некоторую величину происходит соответствующее изменение и плотности материала. Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что пока давление не превысит структурную прочность материала $p_{стр}$ его уплотнения, появление необратимых изменений его пористости не произойдет [6]. Также очевидно, что плотность материала при уплотнении не может превысить плотность составляющих его частиц. Однако из приведенной выше формулы этого явно не следует.

Увеличение внешнего давления приводит не только к уменьшению пористости дисперсного материала, но и к увеличению числа контактов между частицами, увеличению прочности связей. Поэтому для осуществления уплотнения необходимо к телу прикладывать все большее и большее давление.

При уплотнении дисперсного материала приращение внешнего давления *dp* пропорционально его прочности σ_s и изменению его пористости $d\Pi$:

$$dp = -\alpha\sigma_s d\Pi \qquad (2)$$

где α — коэффициент пропорциональности.

Предел текучести σ_s, согласно теории Мизеса Р. [11], равен интенсивности напряжений, т.е. $\sigma_s = p - q$.

При нагружении $q = \xi(p - p_{стр})$. После подстановки значений в формулу (2) и решения получим:

$$p = \frac{p_{стр}}{1-\xi}\left(e^{\alpha^{(1-\xi)}(\Pi_0 - \Pi)} - \xi\right) \tag{3}$$

где Π_0 — начальная пористость дисперсного материала

Поскольку пористость $\Pi = 1 - \rho/\rho_т$, где ρ — плотность материала, $\rho_т$ — плотность частиц материала, последнее выражение можно представить в виде:

$$p = C\left(e^{a(\rho - \rho_0)} - \xi\right) \tag{4}$$

где $a = \alpha(1-\xi)$, $C = p_{стр}/(1-\xi)$.

Полученное выражение (4) учитывая, что значения коэффициента бокового давления не могут превышать единицу, практически полностью совпадает с уравнением (1). Однако коэффициенты обретают физический смысл: коэффициент *C* характеризует сопротивляемость материала уплотнению, коэффициент *a* — интенсивность изменения внешнего давления.

Задаваясь значением необходимой плотности компакта, определяется максимальное давление уплотнения. Регулировка давления в прессах осуществляется изменением длины канала.

Длина канала прессования, обеспечивающая необходимое давление на входе, определится по формуле [9]:

$$L = \frac{s}{\xi f u} ln\left(\frac{p_{max}}{p_{стр}} + 1\right) \tag{5}$$

где *s* — площадь поперечного сечения канала, *u* — периметр поперечного сечения канала, *f* — коэффициент трения материала о стенки канала.

Если длина канала получается большой, то в начале канала рекомендуется выполнять предкамеру.

Уплотнение в прессах осуществляется не только за счет сопротивления канала, но также на перемычках матрицы между каналами. Первоначальное уплотнение осуществляется на всей поверхности матрицы, которая на этом этапе может рассматриваться сплошной. С учетом упругости материала, ранее запрессованного в каналы, при повышении нагрузки происходит его упругая деформация, вследствие чего уплотнение новой порции материала осуществляется на упругом основании. Это снижает интенсивность возрастания давлений в конце этапа уплотнения материала — вогнутая кривая зависимости давления от высоты слоя уплотняемого материала (рис. 2) получает перегиб (точка *B)* и становится выпуклой.

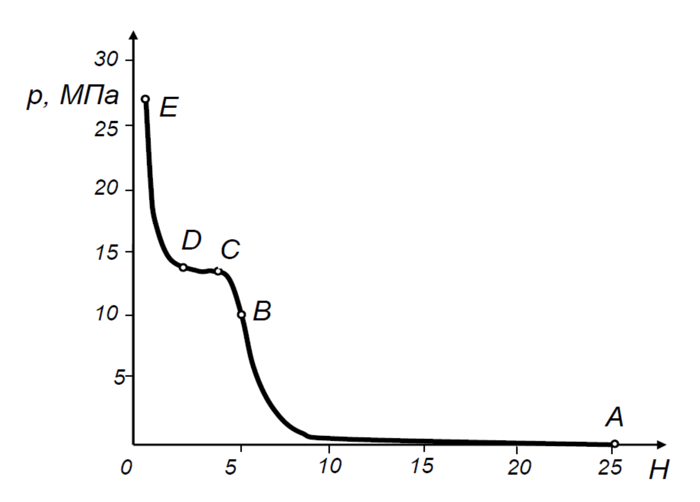


Рис. 2. Зависимость давления от высоты слоя материала
при продавливании через перфорированную поверхность

Fig. 2. Dependence of pressure on layer height of material
when pressing through perforated surface

На новых матрицах эти перемычки выполнены плоскими, вследствие чего с них затруднено сталкивание материала в каналы.

Дальнейшее повышение давлений в зоне прессования при уплотнении материала приводит к преодолению противодавления каналов p_m и в них начинает проталкиваться материал, находящийся

непосредственно над каналами. Таким образом начинается первая стадия процесса продавливания.

Под действием разности давлений, действующих над перемычками и каналами, нарушается предельное равновесие материала, находящегося на перемычках, и последний начинает стекать в каналы по площадкам сдвига. Эта стадия процесса продавливания происходит при постоянном давлении. Однако, для части материала, ограниченной площадками сдвига материала и плоскостью перемычек (жесткое ядро АВС, рис.3), сдвиг затруднен.

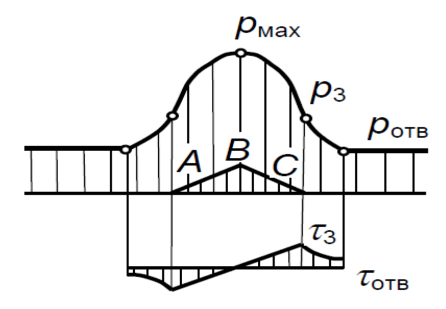


Рис. 3. Распределение давлений прессования и касательных напряжений на перемычках между каналами при продавливании (*ABC* — жесткое ядро на перемычке, $p_{отв}$ — давление над отверстиями, $p_{мах}$ — максимальное давление на перемычке, $\tau_з$ — касательные напряжения на перемычке)

Fig. 3. Distribution of compacting pressures and tangential stresses on bridges between channels under forcing (ABC – rigid core on the bridge, $p_{отв}$ *– pressure above holes,* $p_{мах}$ *– maximum pressure on bridge,* τ_3 *– tangential stresses on bridge)*

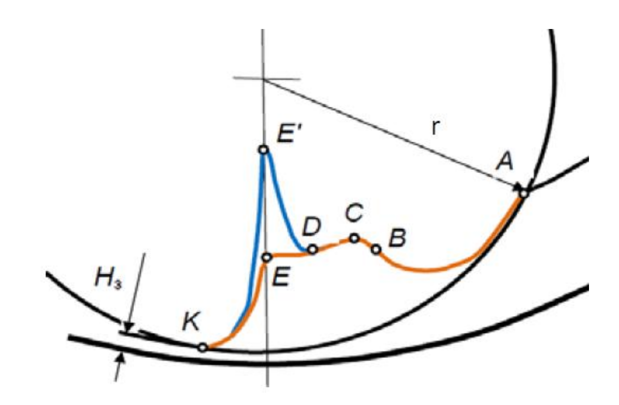


Рис. 4. Распределение давлений в зоне прессования в прессе с кольцевой матрицей: ABCDEK — при выполнении перемычек матрицы плоскими; ABCDE'K — при выполнении перемычек матрицы наклонными; $H_з$ — толщина слоя, напрессованного на рабочей поверхности матрицы

Fig. 4. Pressure distribution in compacting zone in press with ring die: ABCDEK — when matrix jumpers are flat; ABCDE'K — when executing matrix jumpers are oblique; H_3 *— thickness of layer pressed on matrix working face*

На второй стадии продавливания, когда расстояние между рабочими органами становится меньше высоты жесткого ядра образованного на перемычках матрицы (рис. 3), происходит резкий рост давления (рис. 4, кривая *DE'*), значительно превышающий противодавление каналов. Таким образом, давление в рабочей зоне определяется не только противодавлением каналов матрицы, но и сопротивлением перфорированной поверхности матрицы. Среднее значение давлений в зоне проталкивания составит:

$$p_{пр} = p_{отв}\left(1+\frac{2}{3}\frac{f}{\xi_0 \operatorname{tg}\alpha_н}(1-k_п)\right), \quad (6)$$

где $k_п$ — коэффициент перфорации матрицы, $\alpha_н$ — угол наклона площадок сдвига.

Величину максимальных давлений, действующих на второй стадии продавливания, можно регулировать величиной зазора, устанавливаемого между рабочими органами пресса — чем больше зазор, тем меньше давление, действующее на перемычках.

Если зазор между рабочими органами пресса устанавливать бóльшим, чем формируется высота жесткого ядра, то вторая фаза продавливания, характеризующаяся высокими давлениями, будет отсутствовать. Однако при большой величине зазора на поверхности матрицы образуется толстый напрессованный слой материала, на повторное сжатие которого затрачивается значительная часть энергии. Это приводит к снижению производительности пресса, сильному износу вальцов, вследствие их проскальзывания, и

измельчению материала.

Следует отметить, что сказанное относится к новым матрицам, имеющим плоские перемычки между каналами. При эксплуатации за счет износа перемычки приобретают наклон в сторону входа в каналы. На наклонной перемычке зона застоя образоваться не может. Вследствие этого исключается вторая стадия продавливания. В результате условия сталкивания материала в каналы облегчаются, снижаются действующие усилия прессования, уменьшается энергоемкость процесса.

Предлагается такие наклонные перемычки выполнять с помощью конических углублений на поверхности матрицы, причем вершина образующего конуса лежит в пределах отверстия матрицы, а радиус бóльшего основания образующего конуса равен расстоянию от точки, равноудаленной от центров трех соседних отверстий. При таком выполнении рабочей поверхности матрицы все площадки оказываются наклоненными в сторону отверстия, облегчаются условия проталкивания материала через перфорированную поверхность, что позволяет снизить действующие давления и уменьшить, тем самым, энергозатраты на прессование и износ матрицы.

Плотность компактов зависит не только от действующего давления, но и от времени выдержки компакта под давлением. Необходимая рабочая площадь матрицы, определяющая необходимое время выдержки, определится по формуле:

$$F = k_{vs}\frac{Qt}{k_n L \rho_{cp}}, \quad (7)$$

где Q — производительность матрицы пресса; $\rho_{ср}$ — средняя плотность материала, находящегося в канале, k_{vs}= 1,5–2,5 — коэффициент неравномерности распределения материала по поверхности матрицы, t — время пребывания материала в канале матрицы.

Исследованиями установлено, что оптимальной является двухвальцовая схема пресса [10], что определяет отношение радиуса вальца r к радиусу матрицы R. С учетом конструктивных соображений отношение r/R принимается равным 0,40–0,48.

Практикой установлено, что толщина катка вальца, необходимая для обеспечения достаточной жесткости, должна быть равной $t_k=\lambda_1 r$, где λ_1 = 0,25–0,35.

Зависимость ширины вальца B от его радиуса r запишется в виде:

$$\psi = B / r > 2(1-\lambda_1)(2+\lambda_a)\lambda_n, \quad (8)$$

где для подшипников средней широкой серии значение $\lambda_п$ = 0,33–0,38, λ_a = 0,24–0,28.

С учетом значения r/R может быть определен радиус матрицы пресса:

$$R = \sqrt{\frac{F}{2\pi\pi\left(\frac{r}{R}\right)}} \quad (9)$$

После определения R, используя ранее выбранные значения ψ и r/R, определяются радиус и ширина вальца:

$$r = (r / R)R,\ B = \psi\, r \quad (10)$$

Максимальную частоту вращения матрицы пресса можно определить по формуле:

$$n_{max} \le \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{[\sigma]}{\rho l\left[\frac{R}{4k_n}\left(\frac{R}{r}-1\right)+R+L+\frac{l}{2}\right]}}, \quad (11)$$

где [σ] — допустимая прочность гранул на разрыв, Па; l — длина гранул.

Суммарная сила прессования, действующая на рабочие органы пресса, определится по формуле:

$$P = P_1 cos\alpha_1 + P_2 cos\alpha_2 + P_3 cos\alpha_3 \quad (12)$$

где P_1 — равнодействующая давлений, действующих в зоне уплотнения; P_2 — равнодействующая давлений в зоне проталкивания; P_3 — равнодействующая давлений в зоне упругого расширения материала; α_1 — угловая координата наклона равнодействующей давления уплотнения; α_2 — угловая координата равнодействующей давлений проталкивания; α_3 — угловая координата равнодействующей давлений в зоне упругого расширения.

Мощность N, необходимая для осуществления рабочего процесса пресса, определится по формуле:

$$N = 2\pi nz(R-r)(P_1 sin\alpha_1 + P_2 sin\alpha_2 - P_3 sin\alpha_3), \quad (13)$$

где z — число вальцов, n — частота вращения матрицы.

Далее определяется мощность двигателя, используемого для привода пресса:

$$N_{дв} = 1{,}25N / \eta, \qquad (14)$$

где η — коэффициент полезного действия трансмиссии пресса, множитель 1,25 — коэффициент запаса мощности двигателя пресса.

Обсуждение и заключения. Предлагаемая методика позволяет определять основные параметры пресса с кольцевыми матрицами исходя из предъявляемых к компактам требований, структурно-механических свойств уплотняемого материала и рекомендуется для проектирования машин, обеспечивающих формирование биомассы в компакты с заданными свойствами.

Библиографический список

1. Особов, В. И. Машины для брикетирования растительных материалов / В. И. Особов. — Москва : Машиностроение, 1971. — 112 с.

2. Подкользин, Ю. В. К обоснованию конструктивной схемы пресса для гранулирования и брикетирования кормов / Ю. В. Подкользин // Записки ЛСХИ. — 1976. — Т. 290. — С. 42–46.

3. Milan Tica, Milosav Djurdjevic. Theoretical analysis of the dominant construction-technological parameters of the lumber scrap pelleting systems from the aspect of the optimal main function of the system. Machine Design (2007). ISBN 978-86-7892-038-7. pp. 435-438.

4.Wolfgang Stelte, Jens K. Holm, Anand R. Sanadi, Søren Barsberg, Jesper Ahrenfeldt and Ulrik B. Henriksen. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. Fuel. Volume 90, Issue 11, November 2011, pp. 3285– 3290

5. Abedin Zafari, Mohammad Hossein Kianmehr, Rahman Abdolahzadeh. Modeling the effect of extrusion parameters on density of biomass pellet using artificial neural network. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture (2013). ISSN: 2195-3228

6. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. — Москва : Высшая школа, 1979. — 272 с.

7. Сторожев, С. В. Теория обработки металлов давлением / Е. В. Сторожев, Е. А. Попов. — Москва : Машиностроение, 1976. — 424 с.

8. Подкользин, Ю. В. Формирование компакта в канале матрицы пресса / Ю. В. Подкользин // Тракторы и сельхозмашины. — 2011. — №9. — С. 43–44.

9. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. — Ленинград : Колос, 1978, —560 с.

10. Яговкин, П. В. Разработка, исследование и обоснование непрерывного рабочего процесса штемпельного брикетного пресса: автореф. дис. …канд. техн. наук / П. В. Яговкин. — Ленинград-Пушкин, 1982, — 16 с.

11. Федоренко, И. Я. Альтернативная теория прессования кормов / И. Я. Федоренко // Вестник Алтайского государственного университета. — 2013. — №3. — С.95–98.

References

1. Osobov, V.I. Mashiny dlya briketirovaniya rastitel'nykh materialov. [Machines for briquetting plant materials.] Moscow: Mashinostroenie, 1971, 112 p. (in Russian).

2. Podkolzin, Yu.V. K obosnovaniyu konstruktivnoy skhemy pressa dlya granulirovaniya i briketirovaniya kormov. [To validation of constructive scheme of press for pelletizing and briquetting feeds.] Zapiski LSKhI, 1976, vol. 290, pp. 42–46 (in Russian).

3. Milan Tica, Milosav Djurdjevic. Theoretical analysis of the dominant construction-technological parameters of the lumber scrap pelleting systems from the aspect of the optimal main function of the system. Machine Design (2007). ISBN 978-86-7892-038-7. pp. 435-438.

4.Wolfgang Stelte, Jens K. Holm, Anand R. Sanadi, Søren Barsberg, Jesper Ahrenfeldt and Ulrik B. Henriksen. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. Fuel. Volume 90, Issue 11, November 2011, pp. 3285– 3290.

5. Abedin Zafari, Mohammad Hossein Kianmehr, Rahman Abdolahzadeh. Modeling the effect of extrusion parameters on density of biomass pellet using artificial neural network. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture (2013). ISSN: 2195-3228

6. Tsytovich, N.A. Mekhanika gruntov. [Soil mechanics.] Moscow: Vysshaya shkola, 1979, 272 p. (in Russian).

7. Storozhev, S.V, Popov, E.A. Teoriya obrabotki metallov davleniem. [Theory of metal forming.] Moscow: Mashinostroenie, 1976, 424 p. (in Russian).

8. Podkolzin, Yu.V. Formirovanie kompakta v kanale matritsy pressa. [Formation of compact in the channel of

press matrix.] Tractors and Agricultural Machinery, 2011, no. 9, pp. 43–44 (in Russian).

9. Melnikov, S.V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm. [Mechanization and automation of livestock farms.] Leningrad: Kolos, 1978, 560 p. (in Russian).

10. Yagovkin, P.V. Razrabotka, issledovanie i obosnovanie nepreryvnogo rabochego protsessa shtempel'nogo briketnogo pressa: avtoref. dis. …kand. tekhn. nauk. [Development, research and validation of the continuous work process of briquetting ram press: Cand.Sci. (Eng.), diss., author's abstract.] Leningrad-Pushkin, 1982, 16 p. (in Russian).

11. Fedorenko, I.Ya. Al'ternativnaya teoriya pressovaniya kormov. [Alternative theory of feed pressing.] Bulletin of Altai State Agricultural University, 2013, no. 3, pp. 95–98 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.02.2018
Сдана в редакцию 15.02.2018
Запланирована в номер 15.03.2018

Received 15.02.2018
Submitted 15.02.2018
Scheduled in the issue 15.03.2018

Об авторах:

Подкользин Юрий Васильевич,
доцент кафедры «Менеджмент и бизнес-технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1569-6536
podkol45@yandex.ru

Авласенко Людмила Матвеевна,
доцент кафедры «Менеджмент и бизнес-технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5860-0648
Avlas333@mail.ru

Пешхоев Иса Мусаевич,
доцент кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0352-9586
peshkhoev@rambler.ru

Authors:

Podkolzin, Yury V.,
associate professor of the Management and Business Technologies Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1569-6536
podkol45@yandex.ru

Avlasenko, Ludmila M.,
associate professor of the Management and Business Technologies Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5860-0648
Avlas333@mail.ru

Peshkhoev, Isa M.,
associate professor of the Information Technologies Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0352-9586
peshkhoev@rambler.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.923.9 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-179-189

Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию склеивания*

Н. В. Козулько**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Abrasive processing mechanization of parts from polymeric composite materials for paste operation ***

N. V. Kozulko**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена разработке технологического процесса окончательной абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов с применением гибкого шлифовального инструмента. Целью исследования является снижение трудоемкости операции путем замены ручного труда на механизированный, а также повышение качества обработанной поверхности.
Материалы и методы. Использован метод подготовки поверхностей деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) под склеивание путем механической абразивной обработки гибким шлифовальным инструментом.
Результаты исследования. Проанализированы характерные особенности формирования микропрофиля поверхностей стеклопластиковых деталей после обработки гибким абразивным инструментом ручным и механическим способами. Выявлена и обоснована необходимость механизации данной операции. Описаны параметры поверхности, влияющие на формирование качественного клеевого соединения. Рассматриваются особенности конструкции гибкого шлифовального инструмента и влияние их на формирование шероховатости поверхности. Сравниваются данные микропрофиля поверхностей, обработанных шлифовальной шкуркой и лепестковым кругом при различных режимах резания.
Обсуждение и заключения. Механическая обработка лепестковыми кругами может заменить операцию ручного зашкуривания деталей из полимерных композиционных материалов, существенно сократить операционное время обработки и улучшить показатели качества поверхностей деталей для склеивания.

Introduction. The development of the final abrasive processing of parts from polymeric composite materials with the use of the flexible grinding tool is considered. The research objective is to reduce the processing time through displacement of human labour by mechanized work, as well as to improve the treated surface quality.
Materials and Methods. The method of surface preparation of parts made of polymeric composite materials (PCM) is used for gluing through the mechanical abrasive treatment with a flexible grinding tool.
Research Results. Characteristic features of forming the surface microprofile of GRP parts after treatment with a flexible abrasive tool by hand and mechanical methods are analyzed. Need for mechanization of the given operation is determined and validated. The surface parameters affecting the formation of a quality adhesive bond are described. The design features of a flexible grinding tool and their effect on the formation of surface roughness are considered. Data of the surface microprofile treated by a grit cloth and a flap wheel under various cutting conditions are compared.
Discussion and Conclusions. Mechanical processing by flap wheels can replace manual sanding of parts made of polymeric composite materials, drastically reduce the operation time, and improve quality rating of the part surfaces for pasting.

Ключевые слова: абразивная обработка, обработка композиционных материалов, зернистость абразива, лепестковый круг, подготовка поверхности, склеивание, шлифовальная шкурка, гибкий шлифовальный инструмент, финишная обработка, микропрофиль поверхности.

Keywords: abrasive processing, processing of composite materials, abrasive grain sizes, flap wheel, surface preparation, pasting, grit cloth, flexible grinding tool, finish operation, surface microprofile.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: tehn_rostov@mail.ru, natali-ko@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования. Козулько, Н. В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию склеивание / Козулько Н. В // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, №2. — С. 179–189. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-179-189

For citation: N.V. Kozulko. Abrasive processing mechanization of parts from polymeric composite materials for paste operation. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 179–189. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-179-189

Введение. Эффективность работы предприятия во многом зависит от технологической проработки процесса изготовления детали. Операция склеивания является одним из распространенных способов соединения деталей. Чаще всего склеивание применяется при сборке конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Такое соединение позволяет добиться высокой прочности без повреждений волокон композита, в отличии от резьбовых или клепочных соединений, где предварительно выполняется отверстие для установки крепежа [1]. Для получения качественного клеевого соединения, отвечающего конструкторским и эксплуатационным требованиям, необходимо строго соблюдать все технологические рекомендации по подготовке деталей к склеиванию. Наружный слой деталей из ПКМ, подлежащий склеиванию, имеет макро- и микроотклонения от идеальной поверхности, что сильно влияет на прочность клеевого соединения [2]. Поверхность отформованной детали из ПКМ представляет собой верхний слой композита, состоящий из отвержденного связующего с различными неровностями. На ней могут находиться вещества, используемые в качестве разделительных слоев при формовании, а также продукты химических реакций отверждения связующего. Такие соединения и вещества придают поверхности антиадгезионные свойства [3, 4]. Шероховатость поверхности под склеивание должна иметь некоторое оптимальное значение, обеспечивающее технологии максимальную прочность.

Для удаления антиадгезионного слоя и создания оптимальной шероховатости поверхности детали подвергаются механической обработке. На большинстве предприятий по производству изделий из полимеров в качестве инструмента для данной операции применяется шлифовальная шкурка, изготовленная по ГОСТ 13 344–79, ГОСТ 5 009–82 и ГОСТ 10 054–82 [5, 6, 7]. Обработка производится вручную до удаления глянца, убирая с поверхности детали небольшой слой полимеризованного связующего, не повреждая при этом волокон. Существенным недостатком такой обработки деталей из ПКМ является большая трудоемкость операции с применением ручного труда. Обработка крупногабаритных деталей с теоретическим (криволинейным) контуром требует значительного основного времени операции (рис. 1), кроме того увеличивается подготовительно-заключительное время операции.

Во время зашкуривания исполнителю необходимо следить за нажимом на шлифовальный инструмент, так как при недостаточном нажиме глубина обработки будет небольшой, что приводит к наименьшему смачиванию субстрата клеем. При чрезмерном нажиме могут быть повреждены волокна композита и нарушены геометрические параметры детали. При обработке ПКМ шлифовальной шкуркой происходит быстрый износ инструмента, а также засаливание. Листы шлифовальной шкурки необходимо менять по мере износа, чтобы они сохраняли свою режущую способность.

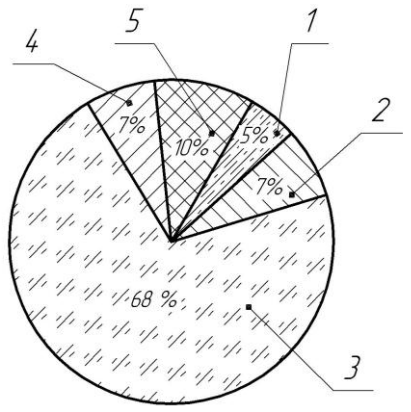


Рис. 1. Диаграмма распределения трудоемкости подготовительной операции к склеиванию: 1— входной контроль, 2 — очистка поверхности, 3 — зашкуривание шлифовальной шкуркой, 4 — очистка поверхности, 5 — контроль

Fig. 1. Distribution diagram of processing time of pasting preparation: 1– input control, 2– surface cleaning, 3 – sanding with grit cloth, 4 – surface cleaning, 5 – control

Причинами низкой механизации операции подготовки поверхностей деталей из ПКМ под склеивание являются такие факторы как:

— недостаток сведений о необходимых параметрах микропрофиля поверхностей из ПКМ под склеивание;

— отсутствие технологических рекомендаций по подбору абразивного инструмента при большом многообразии его на рынке;

— отсутствие исследований влияния параметров абразивного инструмента на формирование микропрофиля поверхности деталей из ПКМ;

— применение шлифовальных головок и лепестковых кругов жесткой конструкции, обработка которыми приводит к повреждению волокон композита.

Снижение трудоемкости и доли ручного труда, повышение стойкости инструмента и обеспечение стабильных характеристик поверхностей осуществляется по двум направлениям. Одним из них является подбор оптимального шлифовального инструмента для механизации процесса зашкуривания. Второе направление предполагает исследование процессов формирования микропрофиля поверхности деталей из ПКМ при различных методах обработки. Работы по изучению соответствующих технологических возможностей и процессов проводились на базе по производству изделий из полимеров для авиационной техники. Ниже приведены некоторые результаты таких исследований.

Выбор инструмента для механизации процесса зашкуривания деталей из ПКМ. Для механизации процесса шлифования авторами было принято решение о применении эластичного шлифовального инструмента. Это инструменты, конструкция и свойства которых допускают значительное перемещение зерен во время работы от статического положения в направлении нормальной составляющей силы резания [8]. Применение такого инструмента позволяет добиться стойкости инструмента, уменьшить напряженность теплового потока, ликвидировать микрорастрескивания поверхностного слоя возникающие при «жестком» шлифовании [9]. Так как большинство полимерных композиционных материалов гигроскопичны, то исключается применение при обработке охлаждающих жидкостей. Таким образом, применение жесткого шлифования или обработка с применением жидких сред недопустимы. Конструкция инструмента на гибкой основе позволяет применять его в процессе «сухого» шлифования. Полимерные композиционные материалы применяются для изготовления деталей с малой жесткостью. Это могут быть обшивки, оболочки, колпаки и т. п. Поэтому, как правило, оказывается целесообразно применять эластичный шлифовальный инструмент. Упругое основание такого инструмента является своеобразным амортизатором, введенным в систему «станок-приспособление-инструмент- деталь» (СПИД), который способен гасить колебания и вибрации, возникающие при абразивной обработке [8,10].

Учитывая вышеизложенное для механизации были использованы инструменты на гибкой основе: шлифовальные ленты, шлифовальные диски, головки, бруски, лепестковые тарельчатые диски, лепестковые круги, войлочные и губчатые диски. Из перечисленного инструмента практическое применение получило ленточное шлифование с применением бесконечных шлифовальных лент. Но такой способ обработки применим лишь к деталям из ПКМ простой формы и с плоскими поверхностями, так как при наличии уступов, перепадов или сложных контуров в конструкции детали после шлифования, имеются необработанное зоны или чрезмерное снятие материала с нарушением геометрии детали (сглаживание углов, уступов, кромок). Аналогичные дефекты обработки имеются и при шлифовании дисками, брусками, войлочными и губчатыми дисками, у которых плоская рабочая поверхность.

Большинство производителей инструментов предлагают лепестковые круги с жесткой конструкцией лепестков для обработки металла или древесины. В результате, после обработки кругами высокой или средней жёсткости происходит разлохмачивание композита с нарушением целостности волокон, что недопустимо согласно техническим условиям. При обработке металла задача шлифования — уменьшить шероховатость поверхности, а для создания поверхности под склейку необходимо создать оптимальную шероховатость. Инструмент для такой операции должен сформировать необходимый микропрофиль при любых значениях параметра шероховатости (Ra) исходной поверхности [8].

Эффективность процесса шлифования зависит также от режимов обработки — скорости резания, скорости подачи, удельного давления. Следует подобрать скорость вращения круга, при которой происходит стабилизация процесса обработки, т. е. под воздействием центробежных и упругих сил шлифовальные лепестки имеют наилучший контакт с обрабатываемой поверхностью. Изменение скорости подачи и удельного давления при шлифовании (изменение динамического радиуса $r_Д$ круга) также влияют на качество поверхности. Динамический радиус $r_Д$ круга представляет собой расстояние от центра круга до поверхности соприкосновения лепестков круга с обрабатываемой деталью без включения станка [8, 11].

Экспериментальные исследования. Для финишной обработки были изготовлены образцы из ПКМ, которые представляют собой сегмент обшивки лопасти вертолета размером (80×200) мм. Материал образцов — стеклопластик, состоящий из композиции тканного стеклопластикового полотна и сполимеризованного эпоксидного связующего.

Образцы обрабатывались плоскими шлифовальными дисками из шлифовальной бумаги, бесконечными шлифовальными лентами, фибровым диском, шлифовальными головками. Перечисленный инструмент показал неудовлетворительный результат. При шлифовании инструментом с плоской рабочей поверхностью на образцах имеются необработанные зоны, находящиеся на конструктивных перепадах слоев стеклопластика. Шлифовальные головки и фибровый диск показали себя как инструмент с высокой жесткостью. После шлифования такими кругами имеются зоны с оголением волокон композита и нарушением целостности этих волокон.

Для дальнейшего исследования в качестве инструмента был выбран гибкий абразивный лепестковый круг фирмы Klingspor модели ММ 630 с рассеченными ламелями (рис. 2).

Лепестковый круг фирмы Klingspor представляет собой шлифовальную оправку Ø 6, на которой радиально закреплены лепестки шлифовальной шкурки. Каждый лепесток рассечен на 10 равных сегментов. Длина сегмента составляет 50 мм. Лепестки завернуты в одном направлении. Конструкция лепестков и их крепление на оправку позволяет отнести этот круг к очень эластичному инструменту. Данная модель имеет 240 размер зерна по стандарту FERA (Европейская Федерация Абразивных Производителей) [12], что соответствует по ГОСТ 3 647–80 — зернистости М 63 и шлифовальной шкурке № 6 [13].

Для подбора оптимальных режимов обработки круг был установлен в шпиндель вертикально-фрезерного станка и с его помощью обработаны образцы из ПКМ. Выбран диапазон частоты вращения (450–1400) об/мин, скорости подачи (100–800) мм/мин. В таблице 1 приведены результаты обработки лепестковым кругом. Учитывая конструкцию и эластичность круга, обработку производили при трех значениях $r_Д$: 55 мм, 60 мм, 65 мм. Данные значения $r_Д$ приняты с учетом максимальной, средней и минимальной площади контакта лепестков с обрабатываемой поверхностью без включения станка. Образцы устанавливались в специальных ложементах и были закреплены при помощи прижимных планок.

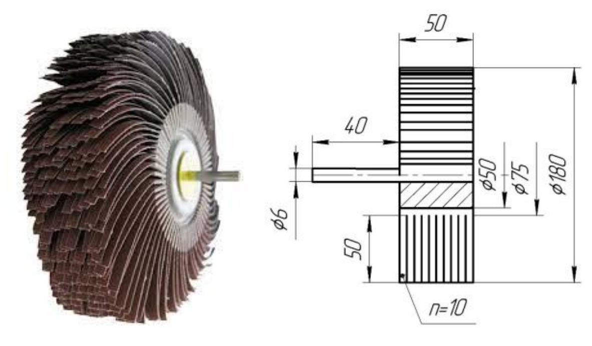


Рис. 2. Лепестковый круг фирмы Klingspor модели ММ 630:
диаметр — 180 мм; ширина — 50 мм; зерно — электрокорунд;
связка — синтетическая смола

Fig. 2. Flap wheel of Klingspor model MM 630:
diameter - 180 mm; width - 50 mm; grain - alundum;
binder - synthetic resin

Таблица 1
Table 1

Результаты обработки лепестковым кругом Klingspor

Processing effect of Klingspor flap wheel

Номер образца	Частота вращения, об/мин	rД, мм	Подача, мм/мин	Ra, мкм	Номер образца	Частота вращения, об/мин	rД, мм	Подача, мм/мин	Ra, мкм
1	450	55	100	0,954	24			500	0,945
2			200	0,924	25			800	0,841
3			315	0,917	26	1120	60	100	1,23
4			500	0,864	27			200	1,17
5			800	0,809	28			315	1,05
6	700	55	100	1,24	29			500	0,947
7			200	1,07	30			800	0,925
8			315	0,998	31	1400	60	100	1,211
9			500	0,845	33			200	1,169
10			800	0,721	33			315	1,087
11	900	55	100	1,44	34			500	0,846
12			200	1,35	35			800	0,765
13			315	1,07	36	1120	65	100	0,744
14			500	1,11	37			200	0,654
15			800	0,954	38			315	0,654
16	1120	55	100	1,52	39			500	0,521
17			200	1,33	40			800	0,521
18			315	1,18	41	1400	65	100	1,145
19			500	1,06	42			200	1,054
20			800	0,941	43			315	0,954
21	1400	55	100	1,67	44			500	0,741
22			200	1,36	45			800	0,644
23			315	1,22					

Образцы, обработанные лепестковым кругом, имеют равномерную, матовую поверхность, без наличия на ней глянца. Нарушений целостности волокон не наблюдается. Значение параметра шероховатости при выбранных режимах обработки Ra=1,22 мкм демонстрируется на профилограмме (рис. 3).

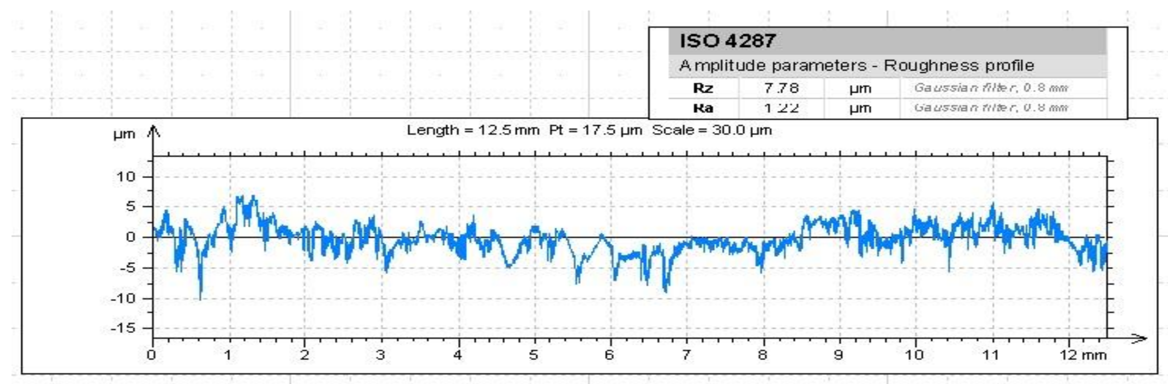


Рис. 3. Профилограмма поверхности, обработанной лепестковым кругом
причастоте 1400 об/мин, скорости подачи 315 мм/мин
и динамическом радиусе $r_Д$=55 мм

Fig. 3. Profilograph of surface treated with flap wheel at
Frequency of 1400 rpm, feed rate - 315 mm / min and dynamic radius - $r_Д$ = 55 mm

После обработки были проведены замеры показателей шероховатости на профилометре Tailor Hobson и визуальный осмотр. Результаты замеров представлены в таблице 1.

В целях подтверждения правильности выбора шлифовального инструмента необходимо сравнить полученные результаты с критериями качественного клеевого соединения [14,15]. Для этого были проведены исследования:

— поверхности образцов до механической обработки;

— эталонной поверхности образца, применяемого для сравнительного контроля на предприятии;

— поверхностей после обработки вручную шлифовальной шкуркой №6 по утвержденной технологии изготовления лопастей.

Ниже приведены результаты замеров шероховатости поверхностей после опрессовки без зашкуривания (рис. 4). Как говорилось ранее, поверхность имеет ярко выраженный пограничный слой в виде глянца, разнотонностей и наличия небольших включений продуктов полимеризации.



Рис. 4. Профилограмма поверхности образца до механической обработки

Fig. 4. Profilograph of sample surface before machining

Эталонный образец представляет собой часть или всю деталь с обработанной поверхностью под склеивание по утвержденной технологии. Изготовление образца производится в присутствии комиссии, состоящей из технолога, конструктора, мастера участка и контролера. Все этапы операции отслеживаются и контролируются на отсутствие нарушений технологии. Внешний вид контрольного образца утверждается заводской комиссией. Поверхность эталонного образца имеет показатель шероховатости Ra=1,31 мкм (рис. 5), что выше значения Ra поверхности после опрессовки (рис. 4).

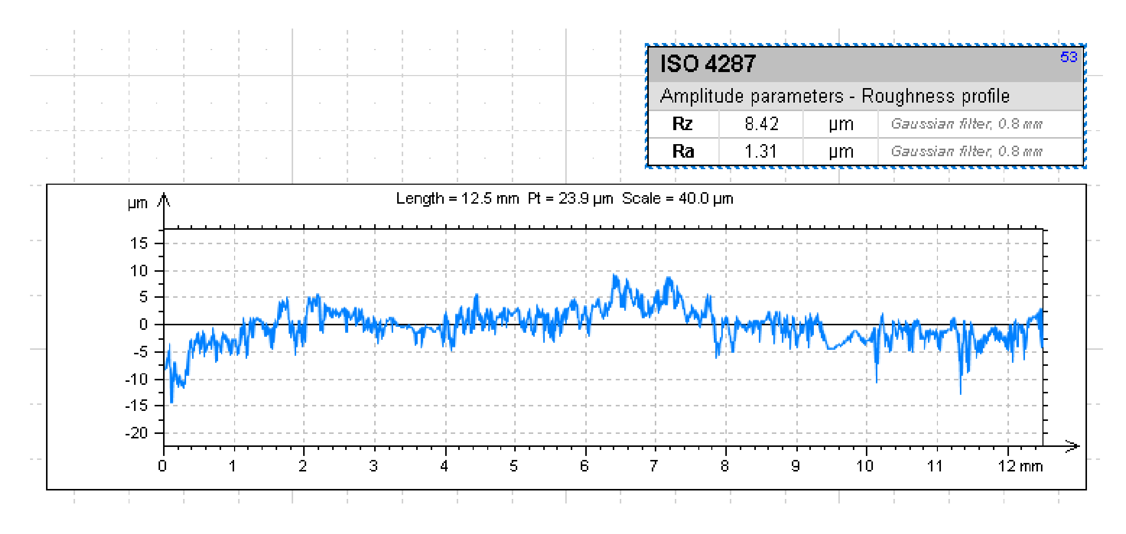


Рис. 5. Профилограмма поверхности эталонного образца

Fig. 5. Profilograph of reference sample surface

Образец обладает матовой поверхностью, на которой отсутствуют необработанные зоны. Шероховатость образцов, обработанных вручную шлифовальной шкуркой № 6, составляет Ra=1,37 мкм (рис. 6). Нарушения целостности волокон и наличие глянца не наблюдается.

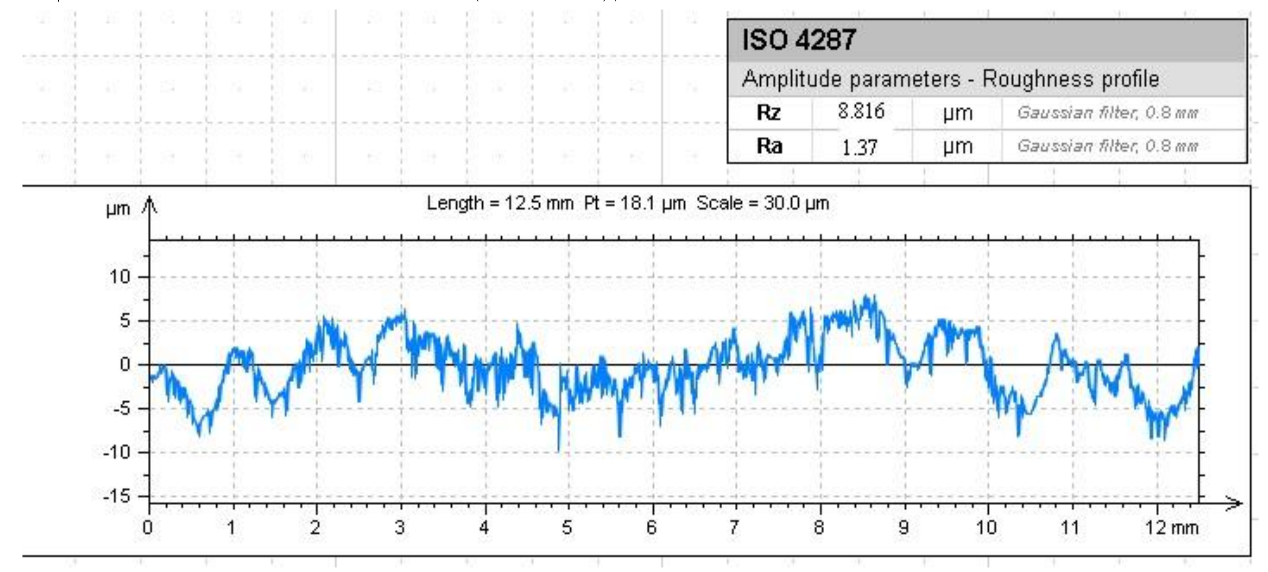


Рис. 6. Профилограмма поверхности,
обработанной вручную шлифовальной шкуркой № 6

Fig. 6. Profilograph of surface hand-worked with grit cloth no. 6

Анализ полученных результатов. На подготовительную операцию детали из ПКМ поступают с глянцевой поверхностью и с показателями шероховатости *Ra*=0,696 мкм, что меньше параметров эталонной обработанной поверхности *Ra*=1,31 мкм (рис. 7).

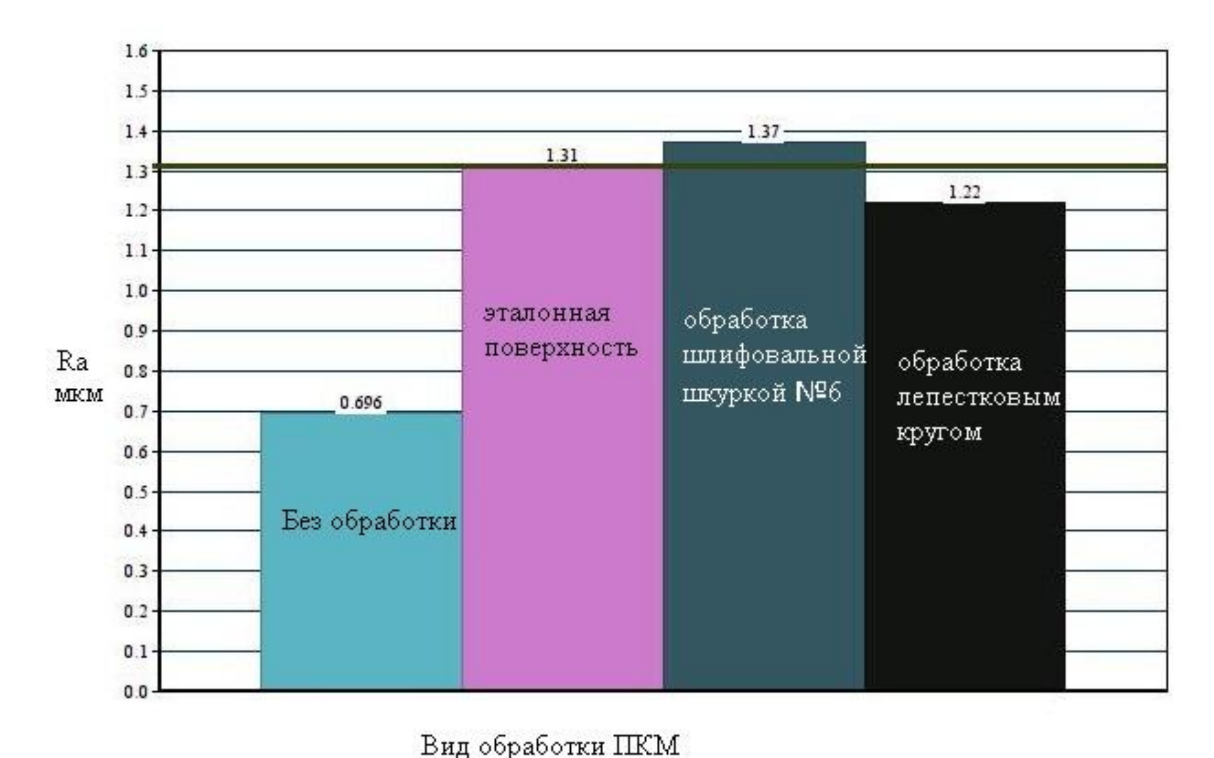


Рис. 7. Сравнение показателей шероховатости поверхностей, обработанных различными способами

Fig. 7. Comparison of roughness indices of surfaces treated in different ways

При соблюдении технологического процесса зашкуривание вручную шлифовальной шкуркой № 6 обеспечивает необходимое качество клеевого соединения. Визуальная оценка качества поверхностей образцов, обработанных шлифовальной шкуркой № 6, совпадает с качеством эталонной поверхности. Ориентируясь на показатели этих поверхностей, можно сказать, что обработка лепестковым кругом также дает возможность по-

лучить поверхность, удовлетворяющую требованиям технической документации. Незначительное уменьшение шероховатости при обработке лепестковым кругом, по сравнению с зашкуриванием шлифовальной шкуркой, происходит за счет равномерного распределения радиальной нагрузки в процессе всего времени обработки.

Влияние скорости резания, подачи и динамического радиуса при шлифовании можно проанализировать на графиках (рис. 8, 9, 10), где представлены зависимости параметров микропрофиля сформированной поверхности от условий резания.

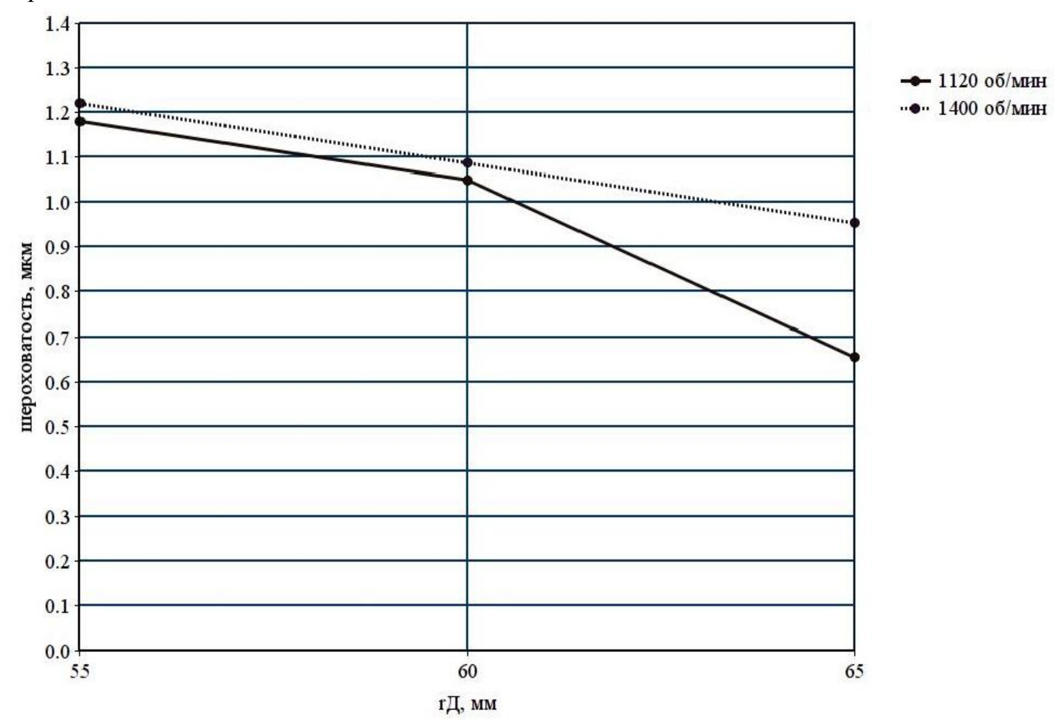
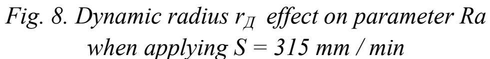


Рис. 8. Влияние динамического радиуса $r_Д$ на параметр Ra
при подаче S=315 мм/мин


Fig. 8. Dynamic radius $r_Д$ effect on parameter Ra
when applying S = 315 mm / min

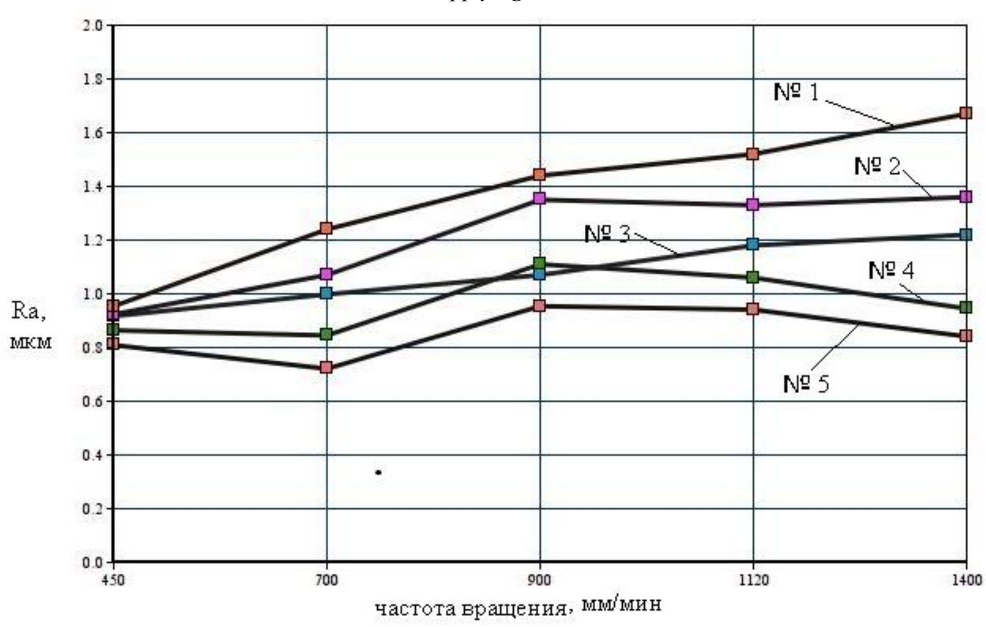


Рис. 9. Влияние частоты вращения шпинделя и подачи на параметр Ra при различных подачах:
№1 — 100 мм/мин; №2 — 200 мм/мин; №3 — 315 мм/мин; №4 — 500 мм/мин; №5 — 800 мм/мин

Fig. 9. Effect of spindle speed and feed rate on parameter Ra at various feed rates:
no. 1 - 100 mm/min; no. 2 - 200 mm/min; no. 3 - 315 mm/min; no. 4 - 500 mm/min; no. 5 - 800 mm/min

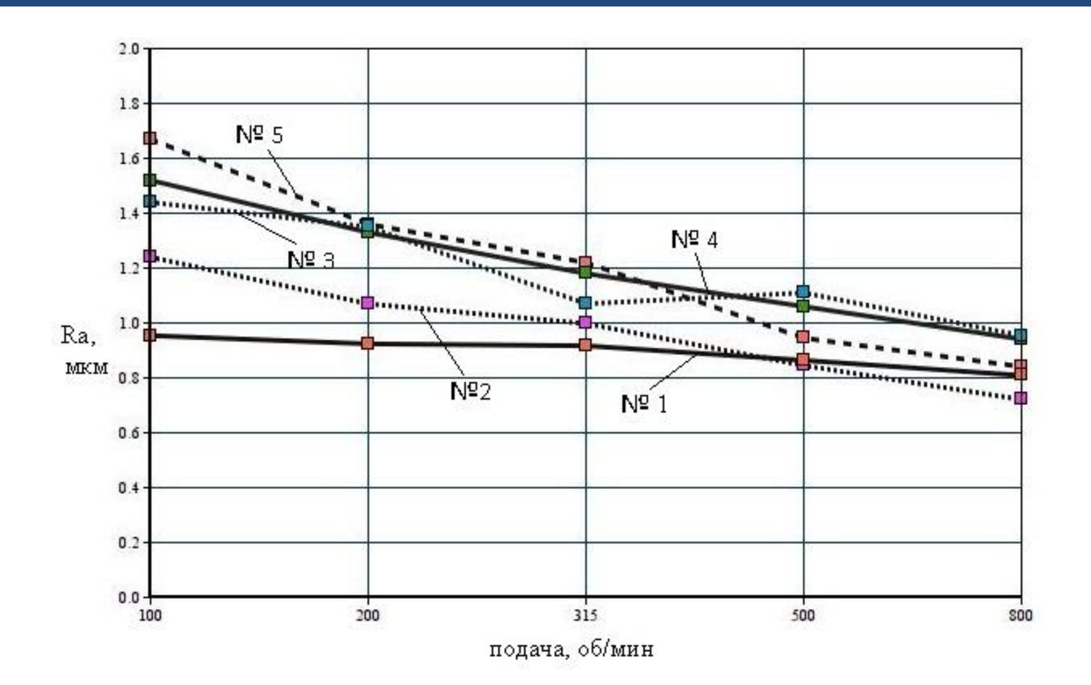


Рис. 10. Влияние частоты вращения шпинделя и подачи на параметр Ra при различной частоте: №1 — 450 об/мин; №2 — 700 об/мин; №3 — 900 об/мин; №4 — 1120 об/мин; №5 — 1400 об/мин

Fig. 10. Effect of spindle speed and feed rate on parameter Ra at various frequencies: no. 1 - 450 rpm; no. 2 - 700 rpm; no. 3 - 900 rpm;no. 4 - 1120 rpm; no. 5 - 1400 rpm

Данные графиков на рисунках 8, 9, 10 демонстрируют следующее:

— при увеличении частоты оборотов шпинделя шероховатость возрастает;

— при увеличении скорости подачи шероховатость уменьшается;

— уменьшение динамического радиуса круга rД приводит к увеличению шероховатости;

— меньшее значение шероховатости совпадает с неудовлетворительными показателями состояния поверхности.

Полученные данные показывают, что увеличение шероховатости и формирование равномерно обработанной поверхности происходит в результате упругих деформаций лепестков и под влиянием центробежных сил. Под влиянием нормального ускорения лепестки прижимаются к обрабатываемой поверхности. С увеличением скорости вращения круга силы резания монотонно возрастают. При этом возрастает число контактирующих лепестков и, как следствие, улучшение режущей способности инструмента. К обратному результату приводит увеличение скорости подачи. Число контактирующих лепестков уменьшается и снижается количество одиночных резов абразивном зерном, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности. Уменьшение параметров шероховатости при увеличении динамического радиуса объясняется конструктивными особенностями инструмента. В покое лепестки находятся в свернутом состоянии, под воздействием центробежных сил они стремятся выпрямиться. Следовательно, пятно контакта лепестков с деталью будет меньше при большем отдалении оси вращения инструмента от обрабатываемой поверхности. Это и приводит к снижению режущей способности абразивных зерен.

При визуальном осмотре обработанных образцов равномерность поверхности демонстрируют образцы, обработанные при частоте оборотов 1120 об/мин и 1400 об/мин, скорости подачи 200 мм/мин и 315 мм/мин и динамическом радиусе $r_Д$=55 мм. При $r_Д$=60 мм и $r_Д$=65 мм образцы имеют четкие зоны незашлифованной поверхности. Следует отметить, что на всех образцах отсутствуют механические повреждения волокон, а также сколы, трещины и расслоения.

Сравнивая с ранее замеренными параметрами шероховатости образца, обработанного вручную шлифовальной шкуркой № 6 (рис. 7), и учитывая качество обработанных образцов, можно сказать, что наилучшими режимами для данного круга являются:

— частота вращения шпинделя 1120–1400 об/мин;

— скорость подачи 200–500 мм/мин;

— динамический радиус 55 мм.

Предложенный способ механической обработки, по сравнению с ручным зашкуриванием, позволяет сократить основное время операции примерно на 80%.

Данный лепестковый круг показал себя как пригодный режущий инструмент для работы на стационарном оборудовании (станках). Геометрические параметры и конструкция позволяют закрепить его на станке без дополнительной специальной оснастки.

Приведенные результаты исследований позволяют сделать вывод, что для улучшения качественных показателей поверхностного слоя следует работать при определенном диапазоне значений окружной скорости круга и скорости подачи.

Заключение. Приведенные результаты исследований позволяют сделать вывод, что для улучшения качественных показателей обрабатываемого поверхностного слоя следует соблюдать определенный диапазон значений окружной скорости круга и скорости подачи. Полученные данные следует учитывать при механизации процесса предварительной подготовки поверхностей деталей из ПКМ к склеиванию. Применение очень эластичного лепесткового круга для данной операции позволит сократить основной цикл обработки без существенных затрат на дополнительную оснастку или оборудование. Установлено, что поверхность, обработанная лепестковым кругом, имеет более равномерную шероховатость поверхности, без зон чрезмерного или недостаточного зашкуривания. Исследования показали, что на формирование микропрофиля поверхности влияют такие факторы, как конструкция инструмента, зернистость шлифовального материала, режимы обработки. Предложенный способ механической обработки существенно сокращает основное время операции по подготовке поверхности под склеивание, что приводит в росту технико-экономических показателей.

Библиографический список

1. Сироткин, О. С. Проектирование, расчет и технология соединения в авиационной технике / О. С. Сироткин, В. И. Гришин, В. Б. Литвинов — Москва : Машиностроение, 2006. — 452 с.
2. Вильнав, Ж.-Ж. Клеевые соединения / Ж.-Ж. Вильнав. — Москва : Техносфера, 2007. — 384 с.
3. Benson, A.-F. Adhesives advance assembly / A.-F. Benson // Assembly. — 1991. — September. — P. 12–15.
4. Karlsson, H. Quality Assurance in Adhesive Joining Technology / H. Karlsson // Assembly Automation. — 1997. —Vol. 17, № 1. — P. 48–55.
5. Межгосударственный стандарт. Шкурка шлифовальная тканевая водостойкая. Технические условия: ГОСТ 13344-79 / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. — Москва :ИПК Издательство стандартов, июль 2003г. — 6 с.
6. Межгосударственный стандарт. Шкурка шлифовальная тканевая и бумажная. Технические условия: ГОСТ 5009-82/ Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. — Москва : ИПК Издательство стандартов, ноябрь 2001г. — 10 с.
7. Межгосударственный стандарт. Шкурка шлифовальная бумажная водостойкая. Технические условия: ГОСТ 10054-82 / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. — Москва : ИПК Издательство стандартов, июнь 1990 г. — 34 с.
8. Щеголев, В. А. Эластичные абразивные и алмазные инструменты (теория, конструкция, применение) / В. А. Щеголев, М. Е. Уланова. — Ленинград: Машиностроение, 1977. — 184 с.
9. Гдалевич, А. И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А. И. Гдалевич. — Москва: Машиностроение, 1990. — 112 с.
10. Димов, Ю. В. Обработка деталей эластичным инструментом: справочник / Ю. В. Димов. — Икутск : Изд-во ИрГТУ,2013. — 484 с.
11. Dimov, Yu.V. Interaction of Lobed Wheel with Machined Surface / Yu. V. Dimov, A. V. Shmatkova // Russian Engineering Research.— 2011. — № 7. — P. 707–711.
12. Информационные системы / Federation of European Producers of Abrasives. — Режим доступа: https://www.fepa-abrasives.com/ (дата обращения : 15.04.17).
13. Межгосударственный стандарт. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля : ГОСТ 3647-80 / Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности. — Москва : ИПК Издательство стандартов, июнь 2004 г. — 18 с.
14. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. — Санкт-Петербур г:Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 136 с.
15. Packham, D.-E. Work of adhesion: contact angles and contact mechanics / D.-E. Packham // International Journal of Adhesion and Adhesives. — 1996. — Vol. 16. — P. 121-128.

References

1. Sirotkin, O.S., Grishin, V.I., Litvinov, V.B. Proektirovanie, raschet i tekhnologiya soedineniya v aviatsionnoy tekhnike. [Design, calculation and technology of connection in aeronautical engineering.] Moscow: Mashinostroenie, 2006, 452 p. (in Russian).
2. Vilnav, Zh.-Zh. Kleevye soedineniya. [Adhesive assemblies]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 384 p. (in Russian).
3. Benson, A.-F. Adhesives advance assembly. Assembly, 1991, September, pp. 12–15.
4. Karlsson, H. Quality Assurance in Adhesive Joining Technology. Assembly Automation, 1997, vol. 17, no. 1, pp. 48–55.
5. Mezhgosudarstvennyy standart. Shkurka shlifoval'naya tkanevaya vodostoykaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST 13344-79. [Interstate Standard. Waterproof abrasive cloth. Specifications: GOST 13344-79.] USSR Ministry of Machine-Tool and Toolmaking Industry. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, July 2003, 6 p. (in Russian).
6. Mezhgosudarstvennyy standart. Shkurka shlifoval'naya tkanevaya i bumazhnaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST 5009-82. [Interstate Standard. Abrasive cloth. Specifications: GOST 5009-82.] USSR Ministry of Machine-Tool and Toolmaking Industry. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, November 2001, 10 p. (in Russian).
7. Mezhgosudarstvennyy standart. Shkurka shlifoval'naya bumazhnaya vodostoykaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST 10054-82. [Interstate Standard. Waterproof abrasive paper. Specifications: GOST 10054-82.] USSR Ministry of Machine-Tool and Toolmaking Industry. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, June 1990, 34 p. (in Russian).
8. Shchegolev, V.A., Ulanova, M.E. Elastichnye abrazivnye i almaznye instrumenty (teoriya, konstruktsiya, primenenie). [Elastic abrasive and diamond tools (theory, design, application).] Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 184 p. (in Russian).
9. Gdalevich, A.I. Finishnaya obrabotka lepestkovymi krugami. [Finishing with flap wheels.] Moscow: Mashinostroenie, 1990, 112 p. (in Russian).
10. Dimov, Yu.V. Obrabotka detaley elastichnym instrumentom: spravochnik. [Part processing by elastic tools: reference book] Irkutsk: IrSTU Publ. House, 2013, 484 p. (in Russian).
11. Dimov, Yu.V., Shmatkova, A.V. Interaction of Lobed Wheel with Machined Surface. Russian Engineering Research, 2011, no. 7, pp. 707–711.
12. Informatsionnye sistemy. [IT systems.] Federation of European Producers of Abrasives. Available at: https://www.fepa-abrasives.com/ (accessed: 15.04.17) (in Russian).
13. Mezhgosudarstvennyy standart. Materialy shlifoval'nye. Klassifikatsiya. Zernistost' i zernovoy sostav. Metody kontrolya: GOST 3647-80. [Interstate Standard. Abrasives. Grain sizing. Graininess and fractions. Test methods: GOST 3647-80.] USSR Ministry of Machine-Tool and Toolmaking Industry. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, June 2004, 18 p. (in Russian).
14. Tabenkin, A.N., Tarasov, S.B., Stepanov, S.N. Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyy opyt. [Roughness, waviness, profile. International experience.] St. Petersburg: Politech. Uni. Publ. House, 2007, 136 p. (in Russian).
15. Packham, D.-E. Work of adhesion: contact angles and contact mechanics. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1996, vol. 16, pp. 121-128.

Поступила в редакцию 27.03.2018
Сдана в редакцию 27.03.2018
Запланирована в номер 17.04.2018

Received 27.03.2018
Submitted 27.03.2018
Scheduled in the issue 17.04.2018

Об авторе:

Козулько Наталья Владимировна,
аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1088-9224
natali-ko@mail.ru

Autor:

Kozulko, Natalia V.,
postgraduate student of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1088-9224
natali-ko@mail.ru

Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2, с. 190–200
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 190–200

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-50 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-190-200

Синтез управления маневром уклонения беспилотного летательного аппарата с учетом терминальных ограничений*

Н. Я. Половинчук[1], С. В. Иванов[2], Л. И. Котельницкая[3]**
[1]Ростовский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Synthesis of evasive maneuver control of unmanned aerial vehicle for terminal restrictions ***

N. Y. Polovinchuk[1], S. V. Ivanov[2], L. I. Kotelnitskaya[3]**
[1]Moscow State Technical University of Civil Aviation, Rostov Branch, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

***Введение*.** Статья посвящена решению задачи формирования субоптимальной стратегии уклонения беспилотного летательного аппарата в условиях неопределенности текущих характеристик движения и будущей стратегии поведения противодействующего ЛА, управление которым формируется с максимальной эффективностью. При этом траектория маневрирующего ЛА должна удовлетворять требованиям оптимальности некоторых заданных функций фазовых переменных в конечный момент времени и условиям прохождения его траектории через заданную терминальную область пространства. Начальные условия и динамические возможности уклоняющегося и противодействующего ЛА в начальный момент времени считаются известными. Управление уклоняющимся ЛА формируется его бортовыми средствами навигации и наведения в реальном масштабе времени на основе нелинейного позиционного управления с обратной связью.
Целью работы является построение алгоритма решения задачи синтеза терминально-оптимального управления движением центра масс высокоскоростного беспилотного летального аппарата, позволяющего осуществлять поиск оптимального управления в функции текущих координат объекта. Рассмотрение задачи в такой постановке отличает ее от классических конфликтных задач о преследовании, решаемых с привлечением теории дифференциальных игр и требует поиска эффективных в вычислительном отношении способов ее решения.
Материалы и методы. Наиболее эффективными для беспилотных ЛА, функционирующих в условиях интенсивных возмущений, жестких ограничений на фазовые переменные и управление, являются так называемые методы оптимального терминального управления, реализующие адаптивные алгоритмы с прогнозом. Поэтому решение сформулированной задачи может быть получено именно на основе использования их идеологии.
Результаты исследования. Разработан новый метод ку-

Introduction. The solution to the problem of development of suboptimal evasive strategy of unmanned aerial vehicle (UAV) under the conditions of uncertainty of the current motion characteristics, and the future behavior strategy of the interdictor is considered. The FV (flying vehicle) control is organized with maximum efficiency. Herewith, the maneuvering FV trajectory must satisfy the requirements of optimality for some given functions of the phase variables at the final time and the conditions of its path through a specified terminal area space. The initial conditions and the dynamic facilities of the evading and opposing FV at the initial time are assumed to be known. The evading FV control is developed by its onboard guidance and navigation system in real time on nonlinear position feedback control. The work objective is to build an algorithm for solving the problem of synthesis of terminal optimal control of motion of center of mass of high-speed UAV that allows searching for the optimal control in function of the current coordinates of the object. Consideration of the problem in this formulation distinguishes it from the classical conflict tasks on the prosecution to be solved with the involvement of the theory of differential games, and demands computationally efficient solution methods.
Materials and Methods. For the UAV operating under the conditions of violent disturbances, the most effective hard constraints on the phase variables and control are the so-called methods of optimal terminal control that implement adaptive algorithms with projection. Therefore, the solution to the formulated problem can be obtained precisely with the use of their ideology.
Research Results. A new method of piecewise-software terminal control of the UAV motion is developed. It differs

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: npolovinchuk@mail.ru, sta399@yandex.ru, kotelnitskaya@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

сочно-программного терминального управления движением беспилотного ЛА, отличающийся от известных тем, что основан на процедуре поиска стратегии управления по критерию наилучшего гарантированного результата с учетом терминальных ограничений. Разработана методика расчета стратегии управления маневром уклонения ЛА в медленном контуре терминальной системы управления, отличающаяся тем, что вместо процедуры прогноза в ускоренном времени и расчета невязок используется процедура преобразования краевой задачи в одноточечную задачу интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающая наличие ненулевого терминального члена в целевом функционале.

Обсуждение и заключения. Несмотря на то, что формирование субоптимальной стратегии наведения в терминальную область уклоняющегося ЛА осуществляется не в форме синтеза, программное управление адаптируется к текущим условиям. Это достигается за счет итерационной процедуры регулярного пересчета терминальных условий, что эквивалентно периодическому замыканию обратной связи. Таким образом, выведение уклоняющегося ЛА в заданную терминальную область осуществляется программно, а управление уклонением от противодействующего ЛА формируется в форме синтеза. Ограничениями на метод являются условия, что модель движения противодействующего ЛА известна и он формирует естественное управление с целью перехвата уклоняющегося ЛА.

from the known ones in that it is based on the procedure of searching a control strategy upon the best guaranteed result with the terminal restrictions. A methodology for calculating the management strategy for the FV evasive maneuver in a slow loop of the terminal control system is worked out. It is characterized in that instead of the forecast procedure in speed-up time and calculation of residuals, the conversion of a boundary value problem to a one-point task of integration of the ordinary differential equations system with account for the occurrence of non-zero terminal member in the cost functional, is used.

Discussion and Conclusions. Despite the fact that the development of a suboptimal guidance strategy in the terminal area of the evading FV is not in the form of synthesis, the control software adapts to the current conditions. This is achieved through the iterative procedures of regular recalculation of terminal conditions that are equivalent to the periodic circuit feedback. Thus, the evading FV is brought to a specified terminal area through software, while evading an interdictor is developed as synthesis. Limitations to the method are the terms that the movement model of the opposing FV is known, and it forms a natural control of the evader intercept.

Ключевые слова: летательный аппарат, перехватчик, уклонение, терминальные условия, траектория, двухточечная краевая задача, управление.

Keywords: flying vehicle, interceptor, avoidance, terminal conditions, trajectory, two-point boundary value problem, control.

Образец для цитирования: Половинчук, Н. Я. Синтез управления маневром уклонения беспилотного летательного аппарата с учетом терминальных ограничений / Н. Я. Половинчук, С. В. Иванов, Л. И. Котельницкая // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, №2 — С.190–200. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-190-200

For citation: N.Y. Polovinchuk, S.V. Ivanov, L.I. Kotelnitskaya. Synthesis of evasive maneuver control of unmanned aerial vehicle for terminal restrictions. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 190–200. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-190-200

Введение. Рассматривается задача формирования субоптимальной стратегии уклонения беспилотного летательного аппарата (ЛА) в условиях неопределенности текущих характеристик движения и будущей стратегии поведения противодействующего ЛА. При этом траектория уклоняющегося ЛА должна удовлетворять требованиям оптимальности некоторых заданных функций фазовых переменных в конечный момент времени, определяющих условия прохождения его траектории через заданную терминальную область пространства.

Начальные условия и динамические возможности уклоняющегося и противодействующего ЛА в начальный момент времени считаются известными. Управление уклоняющимся ЛА формируется за счет автономных средств его бортовой системы управления в реальном масштабе времени.

Целью работы является построение эффективного в вычислительном отношении метода решения задачи синтеза терминально-оптимального управления движением беспилотного уклоняющегося ЛА в вышеназванных условиях.

Рассмотрение задачи в такой постановке отличает ее от классических конфликтных задач о преследовании, решаемых с привлечением теории дифференциальных игр, и требует поиска эффективных в вычислительном отношении способов ее решения [1]. Необходимость такой постановки задачи обусловлена ограниченными возможностями бортовых цифровых вычислительных машин (ЦВМ) беспилотных ЛА.

Материалы и методы. Процесс полета уклоняющегося ЛА описывается вектором фазового состояния $y(t)$, противодействующего — вектором $z(t)$, где $y \in R^n$, $z \in R^m$.

Динамика взаимного движения описывается нелинейными дифференциальными уравнениями следующего вида:

$$\dot{y}(t)=f_y(y,t)+g_u(u,y,z,t),\ y(t_0)=y_0, \tag{1}$$

$$\dot{z}(t)=f_z(z,t)+g_v(v,z,y,t),\ z(t_0)=z_0, \tag{2}$$

где f_y, f_z, g_u, g_v — функции своих аргументов, непрерывные и дифференцируемые достаточное число раз; u, v — функции управления соответственно уклоняющимся и противодействующим ЛА, ($u \in R^r$, $v \in R^p$); $t \in [t_0, t_k]$ — время решения задачи уклонения, t_0 и t_k, соответственно, моменты начала и окончания процесса уклонения [2].

Для решения задачи заданы некоторые компоненты вектора состояния уклоняющегося ЛА в конечный момент t_k i-х

$$y_i(t_k)=\tilde{y}_i,$$

где ($i=\overline{1,n_1}$, $n_1<n$), а $\tilde{y}_i$ являются заданными краевыми значениями состояния ЛА, образующими требуемую терминальную область, являющуюся гладким многообразием следующего вида:

$$y_i(t_k)-\tilde{y}_i=\Phi_{yi}(y,t_k)=0,\ i=\overline{1,n_1}, \tag{3}$$

где Φ_y — векторная функция размерности $n_1 \times 1$.

Условиями задачи задается также требование оптимизации (предположим — максимизации) известной скалярной функции остальных n_2 ($n_1+n_2=n$) фазовых переменных вектора $y(t_k)$:

$$L_1\left[y_{n_1+1}(t_k), y_{n_1+2}(t_k),\dots,y_{n_1+n_2}(t_k);t_k\right]=L_1(y,t_k). \tag{4}$$

В общем случае противодействующий ЛА может быть задействован в любой момент движения уклоняющегося ЛА по траектории, проходящей через терминальную область (3). Этот момент времени t_0 начала реализации игры, а также начальные условия свои и противодействующего ЛА в соответствии с ранее принятым допущением на борту уклоняющегося ЛА определяются мгновенно и точно. Задачей уклоняющегося ЛА в дальнейшем является формирование стратегии уклонения с учетом терминальных ограничений (3), (4). В таком случае общее время реализации игры заранее неизвестно и конечный момент времени t_k не фиксирован. Поэтому и в соответствии с общепринятым подходом будем считать t_k параметром ($t_k \le \tilde{t}_k$, $\tilde{t}_k$ — максимальное время решения задачи, определяемое физическими возможностями игроков, запасами энергии и др.), который должен быть выбран в дополнение к управляющей функции уклоняющегося ЛА $u(t)$ так, чтобы минимизировать время игры [3].

Процесс взаимного движения уклоняющегося и противодействующего ЛА заключается в следующем.

Целью управляемого движения уклоняющегося ЛА с момента t_0 является максимизация расстояния от противодействующего ЛА в момент t_k, а противодействующего ЛА, наоборот, минимизация этого расстояния.

Соответственно управляющие функции ЛА $u(t)$ и $v(t)$ в процессе взаимного полета уклонения-противодействия должны обеспечивать максимум для уклоняющегося и минимум для противодействующего заданной неотрицательной скалярной функции $L_2(y,z,t)$, характеризующей расстояние между ЛА.

Рациональным является подход, учитывающий ограниченность времени процесса уклонения-противодействия, за счет естественной ограниченности на борту взаимодействующих ЛА энергетических ресурсов, расходуемых на реализацию формируемых управлений, заданных интенсивностями управлений, соответственно:

$$I_u=\int_{t_0}^{t_k}\sum_{i=1}^{r}k_i u_i^2(t)\,\mathrm{d}t \ \text{ и } \ I_v=\int_{t_0}^{t_k}\sum_{j=1}^{p}k_j v_j^2(t)\,\mathrm{d}t.$$

Тогда задачу нахождения допустимых оптимальных стратегий управления $u^0(t)$ и $v^0(t)$ необходимо решать в условиях максимина:

$$J(u^0,v^0)=\max_u\min_v\left\{J(u,v)=L_1(y,t_k)+\int_{t_0}^{t_k}\left\{L_2(y,z,t)+\frac{1}{2}\left(v^{\mathrm{T}}(t)K_1v(t)-u^{\mathrm{T}}(t)K_2u(t)\right)\right\}\mathrm{d}t\right\}, \tag{5}$$

где K_1, K_2 — симметричные положительно определенные матрицы соответствующих размерностей [4].

Рассмотрение такой задачи в классической постановке математического аппарата дифференциальных игр является затруднительным ввиду особенностей реализации взаимного движения.

Значительный объем публикаций, посвященных решению игровых задач в классической постановке, предопределяет существенные трудности учета всех известных концепций [2, 5, 6]. В общем случае подходы, использующие альтернативное локальное условие существования седловой точки, требуют при их реализации значительных вычислительных затрат при решении задачи (1)–(5), что обусловлено сложностью интегрирования системы уравнений в частных производных Айзекса и необходимостью достижения условий (3), (4). Поэтому необходимо учитывать обстоятельство, что в сформулированной частной задаче требуется получить решение с точки зрения интересов только лишь одного игрока — уклоняющегося ЛА [7]. В этом случае является целесообразным использование одного из частных подходов, который обеспечивает возможность построения эффективного в вычислительном отношении бортового алгоритма реализации оптимальной стратегии управления уклоняющимся ЛА. Алгоритм базируется на сведении исходной игровой задачи уклонения-перехвата к задаче одностороннего управления уклоняющимся ЛА и исключении требования по выполнению условия существования седловой точки.

На основании этого подхода решение задачи поиска оптимальной стратегии управления для уклоняющегося ЛА $u^0(t)$ будет уже осуществляться не из условия (5), а из более узкого условия следующего вида:

$$J\left[u^0;\bar{v}\left(z,y,t\right)\right]=\max_u\left\{J\left[u,\bar{v}\left(z,y,t\right)\right]\right\}. \qquad (6)$$

При этом управляющая функция противодействующего ЛА $\bar{v}\left(z,y,t\right)$ в задаче (1)–(4) с учетом (6) формируется на собственных наблюдениях за движением уклоняющегося ЛА для его перехвата. Также при решении задачи необходимо учитывать, что противодействующее ЛА имеет возможность воспользоваться любым неоптимальным поведением уклоняющегося ЛА и его замкнутое управление формируется «наилучшим» образом по принципу обратной связи без запаздывания [7].

Подход к решению подобной задачи, но без учета терминальных ограничений вида (3) рассмотрен в работе [8]. Здесь решение основано на поиске субоптимального управления движением ЛА, описываемым квазилинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, а его недостатком является сложность технической реализации ЦВМ беспилотного ЛА.

В данной работе приводится эффективная в вычислительном отношении методика, в которой для формирования субоптимальной стратегии уклоняющегося игрока используется преобразование двухточечной краевой задачи (ДТКЗ) к одноточечной задаче интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений на основе метода инвариантного погружения (МИП) [8].

Однако применение МИП затруднительно для случаев, когда время решения задачи t_k не фиксировано и целевой функционал содержит неквадратичную терминальную составляющую [7]. Поэтому на данном шаге вместо МИП используется метод решения краевой задачи, рассмотренный в работе [9].

Тогда получается следующее решение задачи формирования субоптимальной стратегии управления уклоняющегося ЛА $u^0(t)$ в конфликтной задаче о преследовании с терминальными ограничениями и незаданным временем реализации игры (1)–(4), (6).

Для динамической системы в игровой задаче уклонения-перехвата

$$\dot{x}\left(t\right)=f\left(x,t\right)+g\left(x,u,v,t\right),\ x\left(t_0\right)=x_0,\ x_0=\left|y_0\quad z_0\right|^m, \qquad (7)$$

совокупность необходимых условий экстремума функционала (6), определяющих оптимальную стратегию управления уклоняющегося игрока $u^0\ (t)$ при условии, что противодействующий ЛА формирует позиционное управление с обратной связью $\bar{v}\left(x,t\right)$, имеет вид [2, 8]:

где $x=\left|y\quad z\right|^m$, $x\in R^{n+m}$, $f=\left|f_y\quad f_z\right|^m$, $g=\left|g_u\quad g_v\right|^m$,

$$H\left(x,u,\bar{v},\lambda,t\right)=-L_2\left(x,t\right)-0.5\bar{v}^{\mathrm{т}}\left(x,t\right)K_1\bar{v}\left(x,t\right)+0.5u^{\mathrm{т}}\left(t\right)K_2u\left(t\right)+$$
$$+\lambda^m\left(t\right)f\left(x,t\right)+\lambda^m\left(t\right)g\left(x,u,\bar{v},t\right),$$

$$\bar{v}\left(x,t\right)=K_1^{-1}\left|\begin{matrix}0 & \left[\dfrac{\partial g_v\left(x,v,t\right)}{\partial v}\right]^{\mathrm{т}}\end{matrix}\right|\lambda\left(t\right),$$

$$-\min_u\left\{H\left[x\left(t\right),u\left(t\right),\bar{v}\left(x,t\right),\lambda\left(t\right),t\right]\right\}=-\min_u\left\{0.5u^{\mathrm{т}}\left(t\right)K_2u\left(t\right)+\lambda\left(t\right)g\left(x,u,\bar{v},t\right)\right\}=\bar{H}\left(\bar{x},\lambda,t\right),$$

при этом сформированная субоптимальная траектория $\bar{x}\left(t\right)$ и вектор сопряженных переменных $\lambda\left(t\right)$ описываются следующими уравнениями ДТКЗ:

$$\dot{\bar{x}}(t)=f(\bar{x},t)-G_v(\bar{x},\lambda,t)^m\lambda(t)-\frac{1}{2}\left[\lambda(t)^m\left(\frac{\partial G_v(\bar{x},\lambda,t)}{\partial\lambda}\hat{\otimes}\lambda(t)\right)\right]^m-\frac{\partial\bar{H}(\bar{x},\lambda,t)}{\partial\lambda}=$$

$$=f_x(\bar{x},\lambda,t),\ \bar{x}(t_0)=x_0, \tag{8}$$

$$G_v(\bar{x},\lambda,t)=\frac{\partial g(\bar{x},\lambda,t)}{\partial v}K_1^{-1}\left[\frac{\partial g(\bar{x},\lambda,t)}{\partial v}\right]^m,$$

$$\dot{\lambda}(t)=\left[\frac{\partial L_2(\bar{x},t)}{\partial x}\right]^{\mathrm{T}}-\left[\frac{\partial f(\bar{x},t)}{\partial x}\right]^{\mathrm{T}}\lambda(t)+\frac{1}{2}\left[\lambda(t)^m\left(\frac{\partial G_v(\bar{x},t)}{\partial x}\hat{\otimes}\lambda(t)\right)\right]^m+\frac{\partial\bar{H}(\bar{x},\lambda,t)}{\partial x}=f_\lambda(\bar{x},\lambda,t),$$

$$\lambda_i(t_k)=\begin{cases}\gamma_i,\ i=\overline{1,n_1},\\ -\dfrac{\partial L_1(\bar{x},t_k)}{\partial x_i},\ i=\overline{n_1+1,n_1+n_2},\ \bar{x}=\bar{x}(t_k),\end{cases} \tag{9}$$

$$\gamma=-M_\gamma^{-1}\bar{\gamma},$$

$$M_\gamma=\int_{t_0}^{t_k}\Lambda^m(t)\frac{\partial g_u(\bar{x},u,t)}{\partial u}\left[\frac{\partial g_u(\bar{x},u,t)}{\partial u}\right]^{\mathrm{T}}\Lambda(t)dt,\ \bar{\gamma}=\int_{t_0}^{t_k}\Lambda^m(t)\frac{\partial g_u(\bar{x},u,t)}{\partial u}\left\{u^m(t)K_2+\lambda^m(t)\frac{\partial g_u(\bar{x},u,t)}{\partial u}\right\}^{\mathrm{T}}dt,$$

$$u=u^0(t),$$

$$\dot{\Lambda}(t)=-\left(\left[\frac{\partial f(\bar{x},u,t)}{\partial x}\right]^m+\left[\frac{\partial g(\bar{x},u,t)}{\partial x}\right]^m\right)\Lambda(t),\ \Lambda(t_k)=|\ I\quad 0\ |^m,$$

где $\hat{\otimes}$ — введенная в [7] операция блочного произведения блочных матриц; γ — постоянный вектор $n_1\times 1$ множителей Лагранжа для терминальной (геометрической) связи (3); Λ, M_y, $\bar{\gamma}$ — матрицы $n\times n_1$, $n_1\times n_1$ и вектор $n_1\times 1$ соответственно; I — единичная матрица размерности $n_1\times n_1$.

Время окончания игры t_k находится при этом из дополнительного скалярного уравнения

$$\frac{\partial L_1(\bar{x},t_k)}{\partial t_k}+H(\bar{x},u^0,\bar{v},\lambda,t_k)=0, \tag{10}$$

где $j=j(t_k)$ для $j=\bar{x},u^0,\bar{v},\lambda$.

Существование обратной матрицы M_y^{-1} определяется условием управляемости преследуемого объекта и, кроме того, *m* конечных условий для $\lambda(t_k)$ не определены [10].

Для простоты рассуждений можно воспользоваться упрощенным способом преобразования краевой задачи к одноточечной задаче интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений, при интегрировании которой вместо оптимальной траектории $\bar{x}(t)$ получают приближение $\tilde{x}(t)$ [11].

Обозначим

$$Q(\bar{x},t_k)=\left|\ \gamma\ \vdots\ -\frac{\partial L_1(\bar{x},t_k)}{\partial x_i}\right|,\ \bar{x}=\bar{x}(t_k). \tag{11}$$

Тогда вместо соотношений (8)–(10) получим:

$$\dot{\tilde{x}}(t)=M_1(\tilde{x},Q,t)\left\{\left[\frac{\partial Q(\tilde{x},t)}{\partial x}M_1(\tilde{x},Q,t)-M_2(\tilde{x},Q,t)\right]^{-1}\times\right.$$

$$\left.\times\left[-\frac{\partial Q(\tilde{x},t)}{\partial x}f_x(\tilde{x},Q,t)+f_\lambda(\tilde{x},Q,t)\right]\right\}+f_x(\tilde{x},Q,t), \tag{12}$$

$$\dot{M}_1(\tilde{x},Q,t)=\frac{\partial f_x(\tilde{x},Q,t)}{\partial x}M_1(\tilde{x},Q,t)+\frac{\partial f_x(\tilde{x},Q,t)}{\partial\lambda}M_2(\tilde{x},Q,t), \tag{13}$$

$$\dot{M}_2(\tilde{x},Q,t)=\frac{\partial f_\lambda(\tilde{x},Q,t)}{\partial x}M_1(\tilde{x},Q,t)+\frac{\partial f_\lambda(\tilde{x},Q,t)}{\partial\lambda}M_2(\tilde{x},Q,t), \tag{14}$$

где $Q = Q(\tilde{x}, t)$, $\tilde{x} = \tilde{x}(t)$.

Для матриц чувствительности $\mathrm{M}_1 = \dfrac{\partial x(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0}$ и $M_2 = \dfrac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0}$ заданы начальные условия следующего вида:

$$M_1 = 0\,;\ M_2 = \mathrm{E}\,, \qquad (15)$$

где E — единичная матрица размерности $(n+m)\times(n+m)$.

Результатом интегрирования системы дифференциальных уравнений (12–15) является субоптимальная программная траектория уклоняющегося ЛА $\tilde{x}(t) = \left|\tilde{y}(t)^T \quad \tilde{z}(t)^T\right|^T$, которая обеспечивает его уклонение от противодействующего ЛА и доставку полезной нагрузки в требуемую конечную область (3).

Синтезируемая субоптимальная траектория $\tilde{x}(t)$ адаптируется к текущим условиям функционирования уклоняющегося ЛА по результатам идентификации его динамических характеристик.

Траектория получена на основе представления о наиболее вероятных действиях противодействующего ЛА для перехвата уклоняющегося ЛА и с учетом ограниченности энергетики уклоняющегося ЛА в задаче приземления в заданную область (3). Однако стратегия поведения, основанная на однократно определенной программной траектории, не обладает свойством адаптации и приводит к большим методическим ошибкам [12, 13].

Исходя из того, что решение двухточечной краевой задачи получено приближенным методом и модель движения обоих игроков не всегда адекватна функционированию реальных ЛА, необходимо увеличивать частоту обновления навигационных измерений (уменьшить такт решения навигационной задачи). Это в конечном счете приведет к получению близкого к оптимальному (субоптимальному) решения задачи оптимального управления в форме синтеза. При этом устойчивость решения задачи может быть обеспечена рациональным выбором такта для контура наведения ЛА.

Использование алгоритмов с прогнозированием для ЛА различного назначения показало их высокую эффективность вследствие присущего им свойства адаптации к текущим условиям полета и изменяющимся характеристикам ЛА [14, 15, 16].

Применение для маневрирующих беспилотных ЛА оптимального терминального управления для разработки адаптивных алгоритмов с прогнозом обеспечивает высокое качество их функционирования в условиях действия возмущений большой интенсивности при наличии жестких ограничений на параметры траектории и управление [7].

По этой причине окончательный выбор решения сформулированной задачи может быть сделан в пользу использования методологии синтеза алгоритма с прогнозирующими моделями [14].

Методика формирования управления уклоняющимся ЛА в форме синтеза основывается на следующем [17].

С использованием текущих навигационных измерений определяются начальные условия $x(t_0^j) = x_0^j$ ($j = 0,\ 1,\ 2,\ldots$ — номер итерации в блоке), и в длиннопериодическом («медленном») контуре решения задачи наведения прогнозируется субоптимальная траектория $\tilde{x}^j(t)$ на последующий интервал движения уклоняющегося ЛА $t \in \left[t_0^j, T\right]$ ($t_0^0 = t_0$, $t_0^j > t_0$). В короткопериодическом («быстром») контуре решается задача стабилизации движения ЛА относительно субоптимальной траектории $\tilde{x}(t)$ на интервале времени до пересчета управления в контуре наведения.

В течение одной итерации построения программной оптимальной траектории в «медленном» контуре наведения по текущей навигационной информации $y\left(t_0^j\right)$ в «быстром» контуре стабилизации выполняется несколько итераций [18]. При этом задача навигации решается с тактом, меньшим или равным такту «быстрого» контура [19]. Соответственно, такт решения задачи в «быстром» контуре определяется динамическими характеристиками уклоняющегося ЛА для обеспечения требований устойчивости, управляемости и др., а такт длиннопериодического контура ограничен вычислительными характеристиками бортовой ЦВМ. Такое кусочно-программное управление на интервале времени медленного контура при уменьшении такта будет стремиться к замкнутому управлению в форме синтеза [2].

Результаты исследования. С целью проверки работоспособности, реализуемости и оценки характеристик вычислительной эффективности представленного подхода было выполнено численное моделирование. В

качестве уклоняющегося ЛА использовалась модель гипотетического беспилотного летательного аппарата, технические характеристики которого заданы в соответствии с приведенными в работе [20].

Так как полная модель такого типа ЛА обладает чрезмерной сложностью и трудоемкостью, то приняты упрощающие допущения о линейной аппроксимации коэффициентов аэродинамических сил и моментов. В этом случае размерность модели равна 12, она линейна относительно вектора управления и в векторной форме имеет вид (1). С целью упрощения численных исследований рассматривался участок полета в плоскости движения без маневрирования по углу атаки в течение временного интервала $T=100$ с. Поэтому углы разворота рулей высоты и направления задавались постоянными и равными 0, а управление формировалось только за счет изменения силы тяги ЛА, действующей вдоль его продольной оси.

Модель противодействующего ЛА задана ракетной осесимметричной схемой, а его движение определялось в той же системе координат и в той же плоскости движения и описывалось четырьмя известными детерминированными дифференциальными уравнениями, которые в векторной форме имели вид (2) [15, с. 79]. При этом «неизвестное» уклоняющемуся ЛА управление противодействующего ЛА синтезировалось оптимально по принципу Беллмана — путем минимизации функции промаха [21, 22]

$$Q\left[y(t_k),z(t_k)\right]=0,5\left(k_1\left(y_1-z_1\right)^2+k_2\left(y_2-z_2\right)^2\right)\Big|_{t=t_k}, \tag{16}$$

где y_i, z_i — компоненты фазовых векторов объектов (их координаты в плоскости стрельбы); k_i — масштабирующие коэффициенты ($i=1,2$).

При этом использовалось предположение, не влияющее на общность полученных результатов, что противодействующему ЛА «мгновенно» известна текущая информации о взаимном расположении обоих ЛА и его управление синтезируется без временной задержки [2, 8, 15].

Для моделирования было выбрано два практических случая управления уклоняющимся ЛА. В первом случае формировалось программное релейное управление с одним переключением на 30-й секунде полета с режима полета с уровнем средней тяги на форсированный режим с уровнем максимальной тяги. Моделирование показало, что ЛА перехватывал уклоняющийся ЛА на 61-й секунде, т.е. задача уклонения с положительным исходом не решалась.

При моделировании второго случая процесса уклонения синтезировалось управление уклоняющимся ЛА на основе сформированной методики из условия максимизации функции промаха (16). При учете энергетических возможностей обоих ЛА и использовании сформированного исходного критерия вида (5) оптимальная функция управления тягой двигательной установки уклоняющегося ЛА $P_{ЛА}(t)$ имела релейный вид с двумя переключениями с минимального значения уровня тяги P_{min} на максимальный уровень P_{max}.

Моделирование подтвердило эффективность такой стратегии управления. Задача уклонения решалась с положительным исходом.

Таким образом, моделирование подтвердило, что формирование управления с возможностью переключения тяги двигательной установки с кратностью два и более обеспечивает большую техническую возможность уклонения и адаптации к характеристикам противодействующего ЛА.

При моделировании размерность системы дифференциальных уравнений, интегрируемой в прямом времени, была равна 380.

Требуемое быстродействие бортовой ЦВМ системы управления составило величину не более $1.4*10^5$ Коп/сек, для числа операций контура наведения —около $7*10^4$ Коп с тактом 0,5 сек. Это подтверждает возможность реализации алгоритма управления в реальном масштабе времени на современных ЦВМ [15, 19].

Применение для формирования управления традиционного минимаксного подхода на основе решения уравнений в частных производных приводит к алгоритму, включающему реализацию дополнительных специализированных численных методов, существенно увеличивающих вычислительные затраты, и в рассмотренном случае высоких размерностей динамических объектов (12 и 4 соответственно) практически нереализуемо на борту в реальном масштабе времени [23].

Результаты моделирования приведены на рис. 1-3.

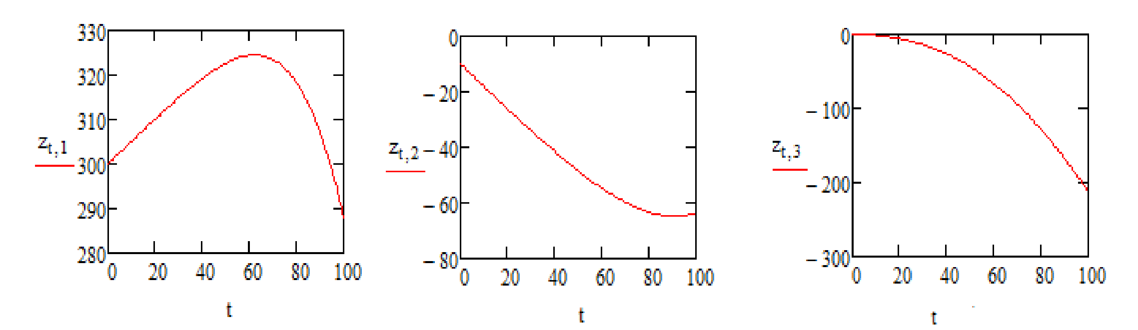


Рис. 1. График линейных скоростей беспилотного ЛА по осям x,y,z (м/с)

Fig. 1. Graph of linear velocities of unmanned aerial vehicle (UAV) along x,y,z *axes (m/s)*

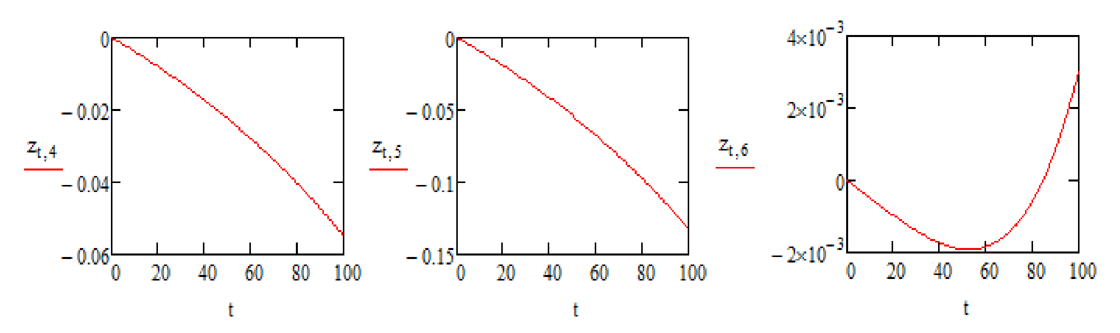


Рис. 2. График угловых скоростей беспилотного ЛА по осям x,y,z (рад/с)

Fig. 2. Graph of angular velocities of UAV along x,y,z *axes (rad/s)*

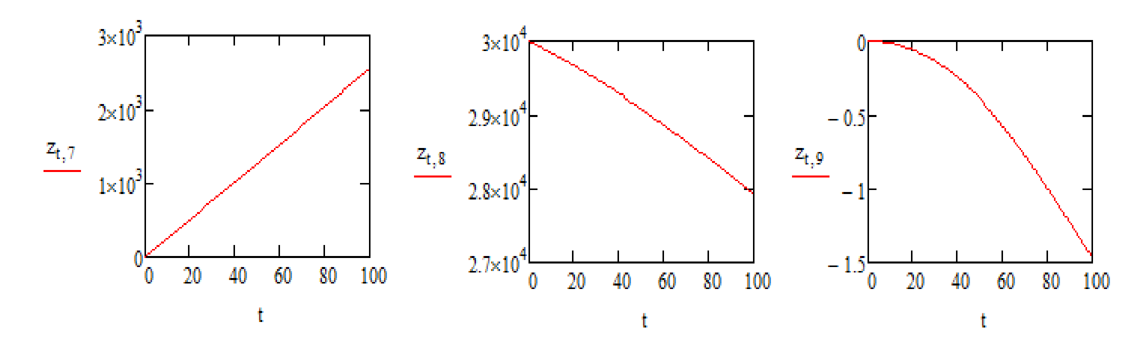


Рис. 3. График координат движения беспилотного ЛА по осям x,y,z (м)

Fig. 3. Graph of movement coordinates of UAV along x,y,z *axes (m)*

Результаты моделирования процесса уклонения ЛА демонстрируют работоспособность алгоритма и возможность его реализации на современных бортовых ЭВМ в реальном времени.

Обсуждение и заключения. Несмотря на то, что формирование субоптимальной стратегии наведения уклоняющегося ЛА в заданную терминальную область осуществляется не в форме прямого синтеза, многошаговый пересчет программного управления позволяет адаптироваться к текущим условиям. Это достигается за счет многошаговой итерационной процедуры регулярного пересчета терминальных условий, что эквивалентно периодическому замыканию обратной связи. Таким образом, выведение уклоняющегося ЛА в заданную терминальную область осуществляется программно, а управление уклонением от противодействующего ЛА эквивалентно формированию управления в форме синтеза. Ограничениями на применение метода являются условия, что модель движения противодействующего ЛА известна и он формирует естественное управление с целью перехвата уклоняющегося ЛА.

Библиографический список

1. Красовский, Н. Н. Позиционные дифференциальные игры / Н. Н. Красовский, А. И. Субботин. — Москва : Наука, 1974. — 254 с.

2. Щербань, И. В. Методика синтеза управления маневром уклонения игрока уклоняющегося ЛА в медленном контуре терминальной системы управления / И. В. Щербань, С. В. Иванов // Двойные технологии. — 2010. — №1.— С. 59–64.

3. Атанс, М. Оптимальное управление / М. Атанс, П. Фалб. — Москва: Машиностроение, 1968. — 764 с.

4. Федоров, В. В. Численные методы максимина / В. В. Федоров. —Москва : Наука, 1979. — 278 с.

5. Красовский, Н. Н. Игровые задачи о встрече движений / Н. Н. Красовский. — Москва : Наука,1970. — 420 с.

6. Понтрягин, Л. С. Избранные научные труды. Т.2. Дифференциальные уравнения. Теория операторов. Оптимальное управление. Дифференциальные игры / Л. С. Понтрягин. — Москва : Наука, 1988. — 575 с.

7. Соколов, С. В. Решение задачи синтеза оптимального управления в конфликтной задаче / С. В. Соколов, И. В. Щербань // Изв.РАН. ТиСУ. — 2003. — №5. — С.35–40.

8. Shcherban I.V. An efficient suboptimal algorithm for player-ally control in a conflict problem // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2007. vol. 46, No. 1. p. 3-8.

9. Барков, В. В. Краевая задача оптимального управления нелинейными детерминированными системами / В. В. Барков, Ю. А. Кочетков // Известия РАН. Теория и системы управления. — 1995. — №6. — С. 184–193.

10. Баратова, Е. Д. Метод штрафов и необходимые условия оптимальности в дифференциальной иерархической игре при неопределенности / Е. Д. Баратова, А. Ф. Тараканов // Изв. РАН. ТиСУ. — 2003. — № 3. — С.30–36.

11. Соколов, С. В. Оптимальное управление спуском космического аппарата в возмущенной атмосфере / С. В. Соколов, И. В. Щербань // Известия РАН. ТиСУ. — 1999.— №1. — С.138–143.

12. Первачев, С. В. Адаптивная фильтрация сообщений / С. В. Первачев, А. И. Перов. — Москва : Радио и связь, 1991. — 160 с.

13. Буков, В. Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В. Н. Буков. — Москва : Наука, 1987. — 230 с.

14. Половинчук, Н. Я. Методы и алгоритмы терминального управления движением летательных аппаратов: монография / Н. Я. Половинчук, И. В. Щербань. — Москва : МО РФ, 2004. — 290 с.

15. Половинчук, Н. Я. Терминальное наведение баллистических летательных аппаратов: монография / Н. Я. Половинчук. — Москва : МО РФ, 2004. — 138 с.

16. Половинчук, Н. Я. Проектирование систем управления ракет-носителей и межконтинентальных баллистических ракет / Н. Я. Половинчук, А. А. Ардашов. — Ростов-на-Дону : РВИРВ, 2010.— 242 с.

17. Половинчук, Н. Я. Синтез алгоритма терминально-оптимального управления высокоскоростным маневрирующим летательным аппаратом / Н. Я. Половинчук, С. В. Иванов // Двойные технологии. — 2017. — №2. — С. 9–13.

18. Аппазов, Р. Ф Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли / Р. Ф. Аппазов, О. Г. Сытин. — Москва : Наука, 1987. — 440 с.

19. Разоренов, Г. Н. Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями) : учебник для вузов / Г. Н. Разоренов, Э. А. Бахрамов, Ю. Ф. Титов. — Москва : Машиностроение, 2003. — 584 с.

20. Соколов, С. В. Теоретические основы синтеза автономных помехоустойчивых бесплатформенных навигационных систем: монография / С. В. Соколов, Н. Я. Половинчук. — Ростов-на-Дону : МО РФ, 1998. — 340 с.

21. Гурман, В. И. Вырожденные задачи оптимального управления / В. И. Гурман. — Москва : Наука, 1977. — 304 с.

22. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-Ши. — Москва : Мир, 1972. — 402 с.

23. Пантелеев, А. В. Теория управления в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, А. С. Бортаковский. — Москва : Высшая школа, 2003.— 585 с.

References

1. Krasovskiy, N.N., Subbotin, A.I. Pozitsionnye differentsial'nye igry. [Positional differential games.] Moscow: Nauka, 1974, 254 p. (in Russian).

2. Shcherban, I.V., Ivanov, S.V. Metodika sinteza upravleniya manevrom ukloneniya igroka uklonyayushchegosya LA v medlennom konture terminal'noy sistemy upravleniya. [Control synthesis technique of an evasive player's evasive maneuver in slow loop of terminal control system.] Dvoynye tekhnologii, 2010, no.1, pp. 59–64 (in Russian).

3. Athans, M., Falb, P. Optimal'noe upravlenie. [Optimal control.] Moscow: Mashinostroenie, 1968, 764 p. (in Russian).

4. Fedorov, V.V. Chislennye metody maksimina. [Numerical methods of maximin.] Moscow: Nauka, 1979, 278 p. (in Russian).

5. Krasovskiy, N.N. Igrovye zadachi o vstreche dvizheniy. [Game problems on meeting of movements.] Moscow: Nauka,1970, 420 p. (in Russian).

6. Pontryagin, L.S. Izbrannye nauchnye trudy. T.2. Differentsial'nye uravneniya. Teoriya operatorov. Optimal'noe upravlenie. Differentsial'nye igry. [Research selecta. V.2. Differential equations. Theory of operators. Optimal control. Differential games.] Moscow: Nauka, 1988, 575 p. (in Russian).

7. Sokolov, S.V., Shcherban, I.V. Reshenie zadachi sinteza optimal'nogo upravleniya v konfliktnoy zadache. [An approach to optimal synthesisin a conflict problem.] Journal of Computer and Systems Sciences International, 2003, no. 5, pp. 35–40 (in Russian).

8. Shcherban I.V. An efficient suboptimal algorithm for player-ally control in a conflict problem. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2007, vol. 46, no. 1, pp. 3-8.

9. Barkov, V.V., Kochetkov, Y.A. Kraevaya zadacha optimal'nogo upravleniya nelineynymi determinirovannymi sistemami. [Boundary value problem of optimal control of non-linear deterministic systems.] Journal of Computer and Systems Sciences International, 1995, no. 6, pp. 184–193 (in Russian).

10. Baratova, E.D., Tarakanov, A.F. Metod shtrafov i neobkhodimye usloviya optimal'nosti v differentsial'noy ierarkhicheskoy igre pri neopredelennosti. [Penalty function method and necessary conditions of optimality in a differential hierarchical game under uncertainty.] Journal of Computer and Systems Sciences International, 2003, no. 3, pp. 30–36 (in Russian).

11. Sokolov, S.V., Shcherban I.V. Optimal'noe upravlenie spuskom kosmicheskogo apparata v vozmushchennoy atmosphere. [Optimal control of descent of a spacecraft in perturbed atmosphere.] Journal of Computer and Systems Sciences International,1999, no. 1, pp.138–143 (in Russian).

12. Pervachev, S.V., Perov, A.I. Adaptivnaya fil'tratsiya soobshcheniy. [Adaptive message filtering.] Moscow: Radio i svyaz', 1991, 160 p. (in Russian).

13. Bukov, V.N. Adaptivnye prognoziruyushchie sistemy upravleniya poletom. [Adaptive Predictive Flight Control Systems.] Moscow: Nauka, 1987, 230 p. (in Russian).

14. Polovinchuk, N.Y., Shcherban I.V. Metody i algoritmy terminal'nogo upravleniya dvizheniem letatel'nykh apparatov: monografiya. [Methods and algorithms for terminal control of aircraft movement: monograph.]. Moscow: MO RF, 2004, 290 p. (in Russian).

15. Polovinchuk, N.Y. Terminal'noe navedenie ballisticheskikh letatel'nykh apparatov: monografiya. [Terminal guidance of ballistic aircraft: monograph.] Moscow: MO RF, 2004, 138 p. (in Russian).

16. Polovinchuk, N.Y., Ardashov, A.A. Proektirovanie sistem upravleniya raket-nositeley i mezhkontinental'nykh ballisticheskikh raket. [Design of control systems for launch vehicles and intercontinental ballistic missiles.] Rostov-on-Don: RVIRV, 2010, 242 p. (in Russian).

17. Polovinchuk, N.Y., Ivanov. S.V. Sintez algoritma terminal'no-optimal'nogo upravleniya vysokoskorostnym manevriruyushchim letatel'nym apparatom. [Synthesis algorithms terminal-optimal control high-speed maneuvering the aircraft.] Dvoynye tekhnologii , 2017, no. 2, pp. 9–13 (in Russian).

18. Appazov, R.F., Sytin, O.G. Metody proektirovaniya traektoriy nositeley i sputnikov Zemli. [Methods for designing trajectories of carriers and Earth satellites.] Moscow: Nauka, 1987, 440 p. (in Russian).

19. Razorenov, G.N., Bakhramov, E.A., Titov, Y.F. Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami (ballisticheskimi raketami i ikh golovnymi chastyami): uchebnik dlya vuzov. [Control systems for aircraft (ballistic missiles and their heads).] Moscow: Mashinostroenie, 2003, 584 p. (in Russian).

20. Sokolov, S.V., Polovinchuk, N.Y. Teoreticheskie osnovy sinteza avtonomnykh pomekhoustoychivykh besplatformennykh navigatsionnykh sistem: monografiya. [Theoretical foundations for synthesis of autonomous noise-immune platformless navigation systems: monograph.] Rostov-on-Don: MO RF, 1998, 340 p. (in Russian).

21. Gourman, V.I. Vyrozhdennye zadachi optimal'nogo upravleniya. [Degenerate optimal control problems.] Moscow: Nauka, 1977, 304 p. (in Russian).

22. Bryson, A., Yu-Chi Ho. Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya. [Applied theory of optimal control.] Moscow: Mir, 1972, 402 c. (in Russian).

23. Panteleev, A.V., Bortakovskiy, A.S. Teoriya upravleniya v primerakh i zadachakh. [Theory of control in examples and problems.] Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 585 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.01.2018
Сдана в редакцию 15.01.2018
Запланирована в номер 15.03.2018

Received 14.01.2018
Submitted 15.01.2018
Scheduled in the issue 15.03.2018

Об авторах:

Половинчук Николай Яковлевич,
профессор кафедры АЭС и ПНК Ростовского филиала Московского государственного технического университета гражданской авиации (РФ,344009, г. Ростов-на-Дону, пр. Шолохова, 262 в), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0002-5120
npolovinchuk@mail.ru

Иванов Станислав Валерьевич,
доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ,344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3237-0415
sta399@yandex.ru

Котельницкая Любовь Ивановна,
доцент кафедры «Математика» Донского государственного технического университета (РФ,344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0928-7728
kotelnitskaya@mail.ru

Autors:

Polovinchuk, Nikolay Y.,
associate professor of the Airborne Electrical Systems and Navigation Instrumentation Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Rostov Branch (RF, 344009, Rostov-on-Don, Sholokhov pr., 262c), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0002-5120
npolovinchuk@mail.ru

Ivanov, Stanislav V.,
associate professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3237-0415
sta399@yandex.ru

Kotelnitskaya, Lubov I.,
associate professor of the Mathematics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0928-7728
kotelnitskaya@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9:531.3 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-201-213

Влияние геометрии режущего инструмента на динамику процесса точения*

В. Л. Заковоротный[1], В. Е. Гвинджилия[2], В. С. Минаков[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Cutting-tool geometry effect on turning process dynamics***

V. L. Zakovorotny[1], V. E. Gvindzhiliya[2], V. S. Minakov[3]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Многие ученые в своих исследованиях, направленных на изучение динамики процесса точения, устойчивости системы резания и формируемых различных притягивающих множеств деформационных смещений, рассматривают станок, как автономную систему. В отличие от этих работ, в данной статье рассматриваются динамические свойства процесса резания, зависящие от параметров динамической связи, формируемой процессом резания, и от свойств подсистем, взаимодействующих с резанием, с учетом влияния внешних возмущений. Многие из этих свойств зависят от геометрии режущего инструмента, следовательно, динамические свойства процесса обработки изменяются при изменении геометрических характеристик инструмента. В частности, изменение геометрических параметров инструмента изменяют устойчивость траекторий формообразующих движений, и их вариации могут вызывать бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений. Траектории формообразующих движений не только определяют геометрическую топологию обрабатываемой детали, но и интенсивность изнашивания инструмента, которые зависят от геометрических параметров инструмента.

Материалы и методы. В статье приводится математическая модель, характеризующая динамику системы, возмущенной биениями шпиндельной группы, и на ее основе с помощью программного пакета Matlab создана модель, позволяющая проводить цифровое экспериментальное исследование.

Результаты исследования. Приводятся результаты математического моделирования и примеры изменения свойств системы в зависимости от геометрических параметров режущего инструмента.

Обсуждение и заключение. Обсуждается вопрос о согласовании управления (например, от системы ЧПУ) с динамическими свойствами процесса резания. Одно из направлений такого согласования связано с выбором углов режущего инструмента такими, чтобы траектории формообразующих движений оставались устойчивыми при всех вариациях технологических режимов.

Introduction. Many scientists in their research aimed at investigating the cutting process dynamics, the cutting system stability and forming various attracting sets of deformational displacements, consider the machine an autonomous system. In contrast to these works, this paper describes the dynamic properties of the cutting process depending on the dynamic linking parameters under cutting, and on the properties of the subsystems interacting with cutting, taking into account the external disturbances effect. Many of these properties depend on the cutting-tool geometry, and thus the dynamic properties of the treatment process change when the tool geometric characteristics change. In particular, changes in the tool geometric parameters alter the stability of the forming movement trajectories, and their variations can cause bifurcations of the attracting sets of deformation displacements. The forming motion patterns determine both the geometric topology of the workpiece, and the tool wear rate, which depend on the tool geometry.

Materials and Methods. A mathematical model that characterizes the system dynamics disturbed by the spindle group wavering is presented. On its basis, a model that allows for digital experimental research is developed through the use of the software package *Matlab*.

Research Results. The mathematical simulation results and examples of changes in the system properties depending on the cutting-tool geometry are presented.

Discussion and Conclusions. The problem of matching the control (for example, from the CNC system) and the cutting process dynamics is discussed. One of the directions of this matching is connected with the selection of cutting-tool corners such as forming motion trajectories could remain steady under all variations of the process conditions.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, sinedden@yandex.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: точение, геометрия инструмента, биения шпинделя, притягивающие множества, геометрическая топология поверхности.

Keywords: turning, tool geometry, spindle wavering, attractive sets, surface geometric topology.

Образец для цитирования: Заковоротный В. Л. Процесс формирования компактов / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, В. С. Минаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, №2. — С. 201–213. DOI:10.23947/1992-5980-2018-18-2-201-213

For citation: V. L. Zakovorotny, V.E. Gvindzhiliya, V.S. Minakov Cutting-tool geometry effect on turning process dynamics. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 201–213. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-201-213

Введение. При изучении динамики процесса точения рассматриваются взаимодействующие через процесс обработки подсистемы со стороны инструмента и обрабатываемой детали. При этом рассматриваются проблемы устойчивости и формируемых в окрестности равновесия различных притягивающих множеств деформационных смещений [1–14]. В этих исследованиях анализируется автономная динамическая система резания. Однако реальный станок, в зависимости от его точности, имеет неуправляемые возмущения, прежде всего, биения шпиндельной группы. Поэтому рассмотрены проблемы преобразования этих возмущений в траектории формообразующих движений и в геометрическую топологию поверхности детали [15–20]. В этих работах показано, что на траектории формообразующих движений, оказывающих наибольшее влияние на геометрическую топологию поверхности, принципиальное влияние оказывают свойства динамической связи, формируемой процессом резания. Эти свойства зависят от геометрии режущего инструмента, ее влияние на динамику системы ограничены экспериментальными исследованиями. Исключением является работа [14], в которой анализируются бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений инструмента за счет изгибных его деформаций, которые приводят к изменениям переднего и заднего углов инструмента. Однако геометрические параметры инструмента в исходном (без резания) состоянии также изменяют силы, следовательно, представление их в координатах состояния системы резания характеризует свойства динамической связи, формируемой резанием. В представленной статье рассматривается вопрос влияния геометрии инструмента на динамические свойства системы резания в единстве устойчивости равновесия, рассматриваемого в подвижной системе координат, движение которой задается управлением, например, программой ЧПУ. Кроме этого анализируются вопросы влияния геометрии инструмента на формируемые в окрестности равновесия притягивающие множества деформационных смещений, а также на интенсивность изнашивания инструмента. Тем самым содержание статьи характеризует дальнейшее развитие знаний о динамике процесса резания, зависящей от геометрических параметров инструмента.

Математическое моделирование. В настоящее время наиболее распространенный метод точения основан на использовании сменных твердосплавных пластин, которые устанавливаются на специальной оснастке их крепления. Вначале остановимся на четырехгранных пластинах из Т15К6, и рассмотрим влияние главного угла в плане ϕ (рис. 1 a, b), а также заднего угла α режущей пластины (рис. 1 c) на динамические свойства процесса обработки. Для четырехгранных пластин очевидно соотношение $\phi+\phi^1=\pi/2$. Тогда взаимосвязь деформационных смещений $X=\{X_1,X_2,X_3\}^T\in\Re^3$ и сил F_Σ при продольном точении абсолютно жесткой детали определяется [18, 21, 22]

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=F_\Sigma, \qquad (1)$$

где $m=\left[m_{s,k}\right], m_{s,k}=m, при: s=k,\ m_{s,k}=0, при: s\neq k,\quad s,k=1,2,3$ в $кгс^2/мм$, $h=\left[h_{s,k}\right], s,k=1,2,3$ в $кгс/мм$, $c=\left[c_{s,k}\right], s,k=1,2,3$ в $кг/мм$ — симметричные, положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $F_\Sigma=F+F^{(i)}$ — силы резания, представленные в координатах состояния и внешних воздействиях. В силах $F_\Sigma=\{F_\Sigma^{(1)},F_\Sigma^{(2)},F_\Sigma^{(3)}\}^T$ выделены две группы: силы, формируемые в области передней поверхности инструмента $F=\{F_1,F_2,F_3\}^T$, и в области контакта его двух задних граней $F^{(i)}=\{F^{(1)},F^{(2)},F^{(3)}\}^T$ с деталью (рис. 1).

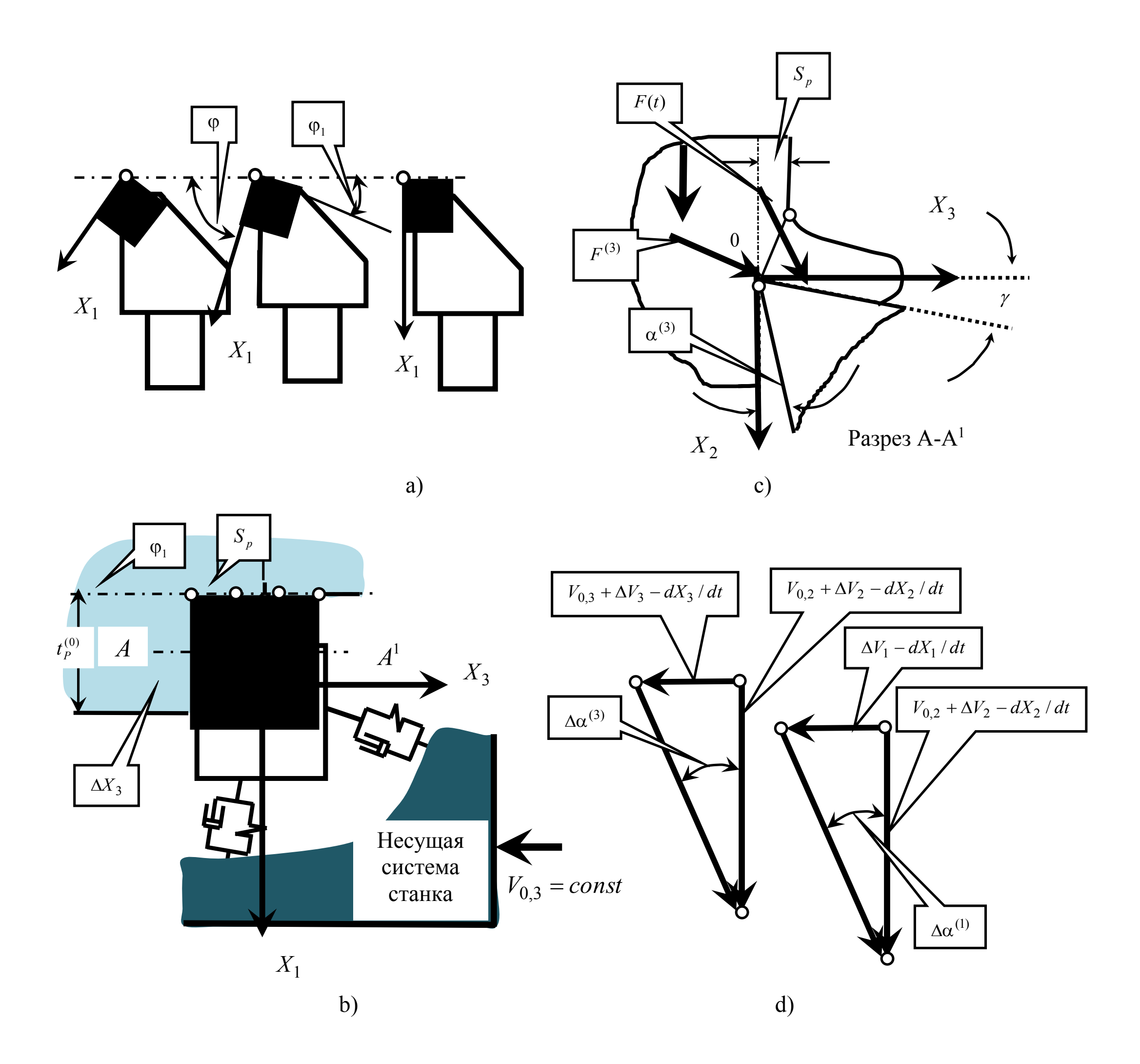


Рис.1. Ориентация осей деформационных смещений и сил, действующих на режущий инструмент: a — варианты изменения главного и вспомогательных углов в плане; b — динамическая модель подсистемы инструмента; c — ориентация сил и деформационных смещений в плоскости, нормальной к поверхности резания;
d — изменение кинематических задних углов инструмента

Fig. 1. Orientation of axes of deformation displacements and forces affecting cutting tool: a – alternative changes in major and minor cutting edge angles; b – dynamic model of tool subsystem; c – orientation of forces and deformation displacement in plane orthogonal to cutting surface; d – working clearance variation

Расположим ортогональную систему координат $\{X_1, X_2, X_3\}$ таким образом, чтобы ось X_2 оставалась неизменной. Систему координат будем вращать относительно этой оси таким образом, чтобы ось X_1 совпадала с направлением вершины режущего лезвия, как показано на рис. 1 а. В системе координат $\{X_1, X_2, X_3\}$ будем рассматривать матрицы жесткости и скоростных коэффициентов инструмента. Правила преобразования матриц $m = \left[m_{s,k}\right]$, $h = \left[h_{s,k}\right]$, $c = \left[c_{s,k}\right]$ за счет поворота системы координат изложены в работах [21–24]. Также учтем радиальные биения, представленные заданными функциями $\Delta X_1(t)$ $d\Delta X_1(t)/dt = \Delta V_1(t)$.

Вначале подробно рассмотрим случай, когда $\phi \Rightarrow \pi/2$, но несколько меньше, чтобы контакт задней вспомогательной грани с деталью существовал только на участке текущего значения оборотной подачи. На рис.1 b участки контакта показаны светлыми кругами. Тогда направление скорости подачи можно считать совпадающим с осью X_3, а по оси X_1 имеет место смещение вершины инструмента относительно оси детали. Грани инструмента вместе с осью X_2 образуют ортогональную систему координат. Для определения уравнения динамики выясним представление сил, действующих на инструмент в координатах состояния системы. Для сил $F^{(i)} = \{F^{(1)}, F^{(2)}, F^{(3)}\}^T$

$$\begin{cases} F^{(1)} = \rho_0\{\int_{t-T}^{t}[V_{0,3} - dX_3 / dt]dt\}\exp[\alpha_0(\Delta V_1(t) - dX_1/dt)]; \\ F^{(2)} = k_T[F^{(1)} + F^{(3)}]; \\ F^{(3)} = \rho_0[t_P^{(0)} + \Delta X_1(t) - X_1(t)]\exp\alpha_0[V_{0,3} - dX_3/dt], \end{cases} \quad (2)$$

где ρ_0 — силы, приведенные к длине контакта в $[кг/мм]$; α_0 — коэффициенты нарастания сил; $\Delta X_i(t)$, $\Delta V_i(t) = d\Delta X_i / dt, \quad i = 1,2,3$ — заданные функции биений; k_T — коэффициент трения; $V_{0,3} = const$, $t_P^{(0)} = const$ — скорость продольного суппорта и припуск без учета упругих деформаций; $T = 1/\Omega_0$ — время оборота детали. В (2) приняты во внимание следующие свойства:

1) Силы, действующие на заднюю грань, имеют направление X_3, и они увеличиваются при возрастании площади контакта грани с деталью (рис. 1 b и c). Следовательно, они зависят от величины припуска с учетом упругой деформации в направлении X_1.

2) Силы, действующие на заднюю вспомогательную грань, имеют направление по оси X_1. Они также увеличиваются при возрастании длины контакта с деталью. Поэтому они зависят от подачи с учетом упругой деформации в направлении X_3. Если равновесие является асимптотически устойчивым, то

$$\int_{t-T}^{t}[V_{0,3} - dX_3 / dt]dt \Rightarrow S_p^{(0)} = const.$$

3) Силы $F^{(1)}$ и $F^{(3)}$ непропорционально быстро увеличиваются при сближении задних граней с деталью, то есть в зависимости от задних углов $\alpha^{(1)}$ и $\alpha^{(3)}$. Задние углы определяются (рис. 1 d)

$$\alpha^{(i)}(t) = \alpha^{(i,0)} + \Delta\alpha^{(i)}(t); \quad \Delta\alpha^{(i)}(t) = arctg\frac{V_{0,i} + \Delta V_i(t) - dX_i / dt}{V_{0,2} + \Delta V_2(t) - dX_2 / d}, i = 1,3. \quad (3)$$

Таким образом, закон увеличения сил при сближении поверхностей зависит от задних углов и определяется параметрами α_1 и α_3. В таблице 1 приведены идентифицированные значения этих параметров при обработке конструкционной стали 20Х при различных значениях задних углов $\alpha^{(1,0)} = \alpha^{(3,0)} = \alpha_0$ и скоростей резания. Там же приведены параметры ρ_0, имеющие смысл жесткости.

Таблица 1

Table 1

Параметры задних углов инструмента при обработке конструкционной стали

Cutter clearance parameters under structural steel processing

$\alpha^{(0)}$	0^0			3^0			6^0		
$V_3^{(0)}, м/с$	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
$\alpha_0, с/мм$	50,0	45,0	30,0	30,0	22,0	15,0	10,0	7,0	5,0
$\rho_0, кг/мм$	10,0	8,7	7,5	5,0	4,5	4,1	2,0	1,5	1,3

Так как вариации скорости резания за счет деформационных смещений являются малыми, то в (2) зависимость параметров системы от скорости резания можно не принимать во внимание. Кроме этого в силах F учтем их запаздывание по отношению к деформационным смещениям [21].

$$\begin{cases} T_1 dF_1 / dt + F_1 = \rho_{0,0}\chi_1\{1 + \mu\exp[-\alpha(V_{0,2} - dX_2/dt)]\}[t_P^{(0)} + \Delta X_1(t) - X_1(t)]\int_{t-T}^{t}\{V_{0,3} - dX_3/dt\}dt; \\ T_2 dF_2 / dt + F_2 = \rho_{0,0}\chi_2\{1 + \mu\exp[-\alpha(V_{0,2} - dX_2/dt)]\}[t_P^{(0)} + \Delta X_1(t) - X_1(t)]\int_{t-T}^{t}\{V_{0,3} - dX_3/dt\}dt; \\ T_3 dF_3 / dt + F_3 = \rho_{0,0}\chi_3\{1 + \mu\exp[-\alpha(V_{0,2} - dX_2/dt)]\}[t_P^{(0)} + \Delta X_1(t) - X_1(t)]\int_{t-T}^{t}\{V_{0,3} - dX_3/dt\}dt, \end{cases} \quad (4)$$

где $T_i, i = 1,2,3$ — постоянные времени запаздывания сил; $\rho_{0,0}$ — давление на переднюю поверхность инструмента в области малых скоростей; μ — коэффициент соотношения сил в областях малых и больших скоростей; α — коэффициент, определяющий убывание сил при увеличении скорости; $V_{0,2}$ — скорость резания. В (3) принято во внимание, что в переходных процессах ориентация сил изменяется. Системы (1)–(3) характеризуют

динамику процесса резания, возмущенную биениями $\Delta X_1(t)$ шпиндельной группы. В этой системе выражение (2) характеризует нелинейную диссипацию. В частности, если биения шпинделя отсутствуют и точка равновесия устойчива, то силы, действующие на задние грани, во-первых, постоянны, во-вторых, они являются малыми по отношению к силам, действующим на переднюю грань. Таким образом, без биений и других неуправляемых возмущений, например, при наличии кинематических возмущений со стороны приводов подачи, связь, формируемая в области контакта задних граней с деталью, не влияет на устойчивость. Ситуация меняется принципиально, если равновесие неустойчиво или в системе имеют место неуправляемые возмущения. В этом случае связь, формируемая в области контакта задних граней, которая зависит от задних углов инструмента, изменяет динамику. Ее изменение зависит от $\delta V_i(t) = \Delta V_i(t) - dX_i / dt$. Вначале рассмотрим упрощенный случай преобразования $\delta V_1(t) = v_{0,1}\sin(\Omega t)$ в силы $F^{(1)}(t)$, изменяющие деформационные смещения $X_1(t)$. Кроме этого положим, что в системе установилось постоянное значение величины подачи, то есть в (2) $F^{(0,1)} = \rho_1\{\int_{t-T}^{t}[V_{0,3} - dX_3 / dt]dt - \Delta X_3(t)\} = const$. Тогда изменения сил $\Delta F^{(1)}(t)$, обусловленные вариациями $\delta V_1(t)$, будут

$$\Delta F^{(1)}(t) = F^{(0,1)}\{e^{\alpha_1 v_{0,1}\sin\Omega t} - 1\}. \qquad (5)$$

Если усреднить (5) по периоду функции $\delta V_1(t)$, то имеем следующее выражение для постоянной составляющей приращения силы $\Delta F^{(1)}(t)$

$$\Delta\tilde{F}^{(1)} = F^{(0,1)}\hat{V}(\alpha_1 v_{0,1}), \qquad (6)$$

где $\hat{V}(\alpha_1 v_{0,1}) = \{\frac{1}{2}(\alpha_1 v_{0,1})^2 + \frac{1}{192}(\alpha_1 v_{0,1})^4 + ...\}$. Приращение $\Delta\tilde{F}^{(1)}$ вызывает изменение деформаций X_1, от которых зависит диаметр обрабатываемой детали. Вариации X_1 вызывают и изменения сил, действующих на переднюю поверхность инструмента $F(t)$. Поэтому имеет место перераспределение сил и деформационных смещений, зависящее от времени. Это приводит к динамической перестройке свойств системы в целом, например, к преобразованию детерминированной в хаотическую динамику системы.

Влияние геометрии инструмента на устойчивость и формообразующие траектории. Проанализируем влияние углов инструмента на динамику системы на примере. Параметры подсистемы инструмента представлены в таблице 2, модели связи — в таблице 3. Для удобства примем $T_1 = T_3 = 0,5T_2 = T$. Изучение выполнено на основе цифрового моделирования с использованием программного комплекса Matlab. Рассмотрен пример продольного точения стали типа 20Х с режимами: глубина $t_P^{(0)} = 2,5мм$, подача $S_P^{(0)} = 0,1мм$, скорость $V_{3,0} = 1,5м/с$. Обработка ведется с радиальными биениями $t_P(t) = t_P^{(0)}[1 + \mu(t)]$ ($\mu(t) = \mu_0 \sin\Omega t$).

Таблица 2

Table 2

Параметры подсистемы инструмента

Tool subsystem parameters

$h_{1,1}, кг\cdot с/мм$	$h_{2,2}, кг\cdot с/мм$	$h_{3,3}, кг\cdot с/мм$	$h_{1,2} = h_{2,1}, кг\cdot с/мм$	$h_{1,3} = h_{3,1}, кг\cdot с/мм$	$h_{2,3} = h_{3,2}, кг\cdot с/мм$
0,25	0,15	0,15	0,1	0,08	0,08
$c_{1,1}, кг/мм$	$c_{2,2}, кг/мм$	$c_{3,3}, кг/мм$	$c_{1,2} = c_{2,1}, кг/мм$	$c_{1,3} = c_{3,1}, кг/мм$	$c_{2,3} = c_{3,2}, кг/мм$
1000	800	800	200	100	100

Таблица 3

Table3

Параметры динамической связи процесса резания

Parameters of dynamic link of cutting process

$\rho_0, кг/мм^2$	$\alpha, с/мм$	$\alpha_0, с/мм$	$T, с$	$\rho_0, кг/мм$
500	0,1	(20 − 50)	(0,01 − 0,1)	2,0

Ранее опубликован материал, касающийся свойств притягивающих множеств деформационных смещений инструмента с учетом биений и кинематических возмущений [10, 18]. Дополним его особенностями влияния α_0 на устойчивость и формируемые притягивающие множества. Вначале рассмотрим пример изменения стационарного состояния системы в зависимости от амплитуды биений при различных задних углах (рис. 2). Частота биений равна 50,0 с$^{-1}$. Здесь система без биений имеет асимптотически устойчивое равновесие, которое во времени не смещается (рис. 2 а). При малых амплитудах биений (на иллюстрации этот случай не приведен) за счет биений устанавливаются устойчивые периодические движения в деформационных смещениях, их скоростях и силах.

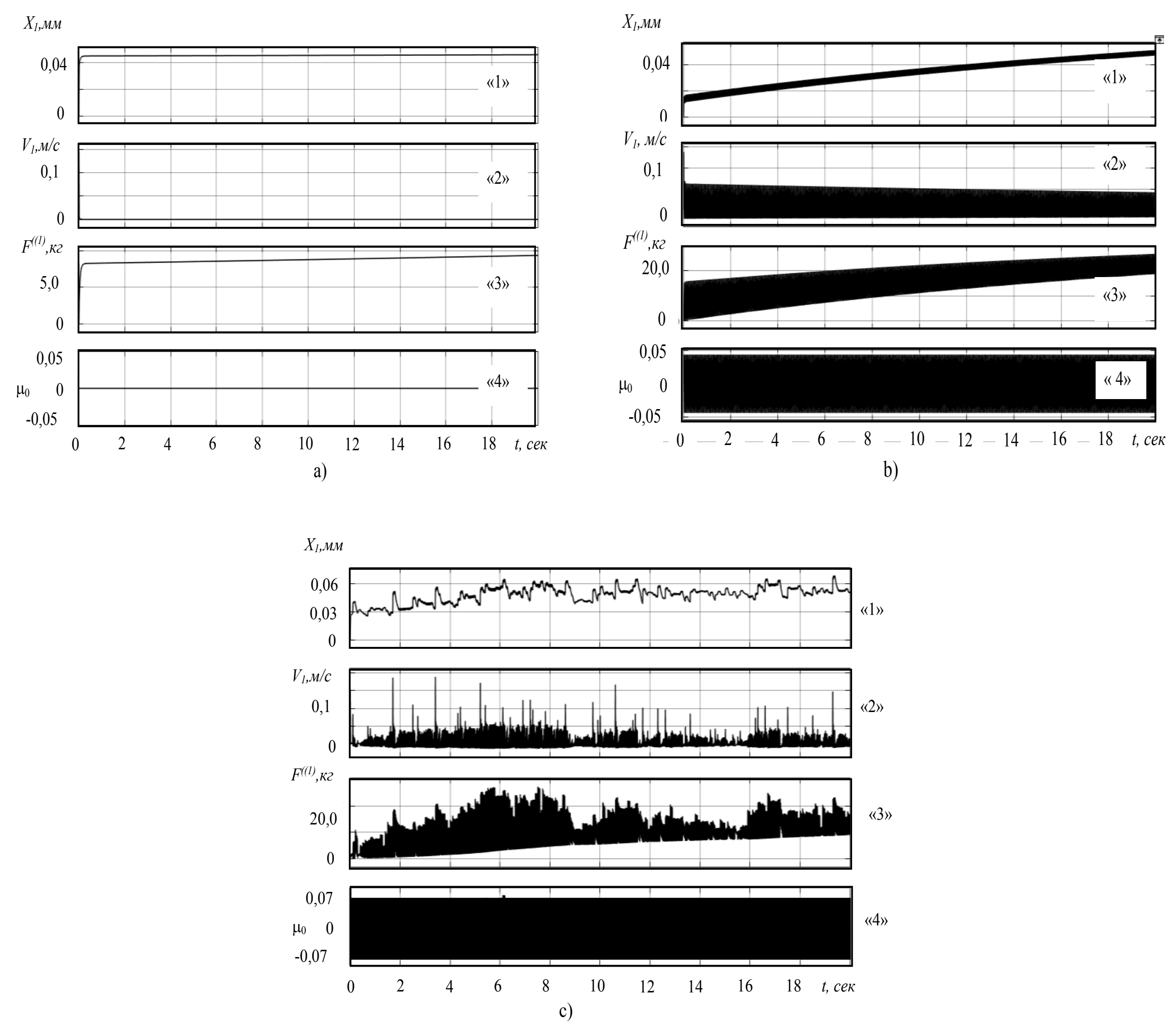


Рис. 2. Пример изменения деформационных смещений $X_1(t)$ «1», их скоростей $V_1(t)$ «2», сил «3», действующих на заднюю грань инструмента, и биений шпиндельной группы «4»:
а — биения отсутствуют; b — $\alpha_0 = 20$, $\mu_0 = 0,05$; c — $\alpha_0 = 50$, $\mu_0 = 0,07$

Fig. 2. Example of deformation displacement change $X_1(t)$ «1», their velocities $V_1(t)$ "2", forces "3" affecting back of tool and spindle group "4" wavering: a —no wavering; b — $\alpha_0 = 20$, $\mu_0 = 0,05$; c — $\alpha_0 = 50$, $\mu_0 = 0,07$

В этом случае усредненные по периоду колебательные скорости и силы равны нулю, а средние значения деформационных смещений постоянны. При увеличении амплитуды биений (рис. 2 b) наблюдается смещение во времени усредненных по периоду деформаций. Это отображается в монотонном и медленном изменении диаметра обработки. Изменение диаметра обусловлено не износом, который не рассматривается, а эффектами нелинейной динамики.

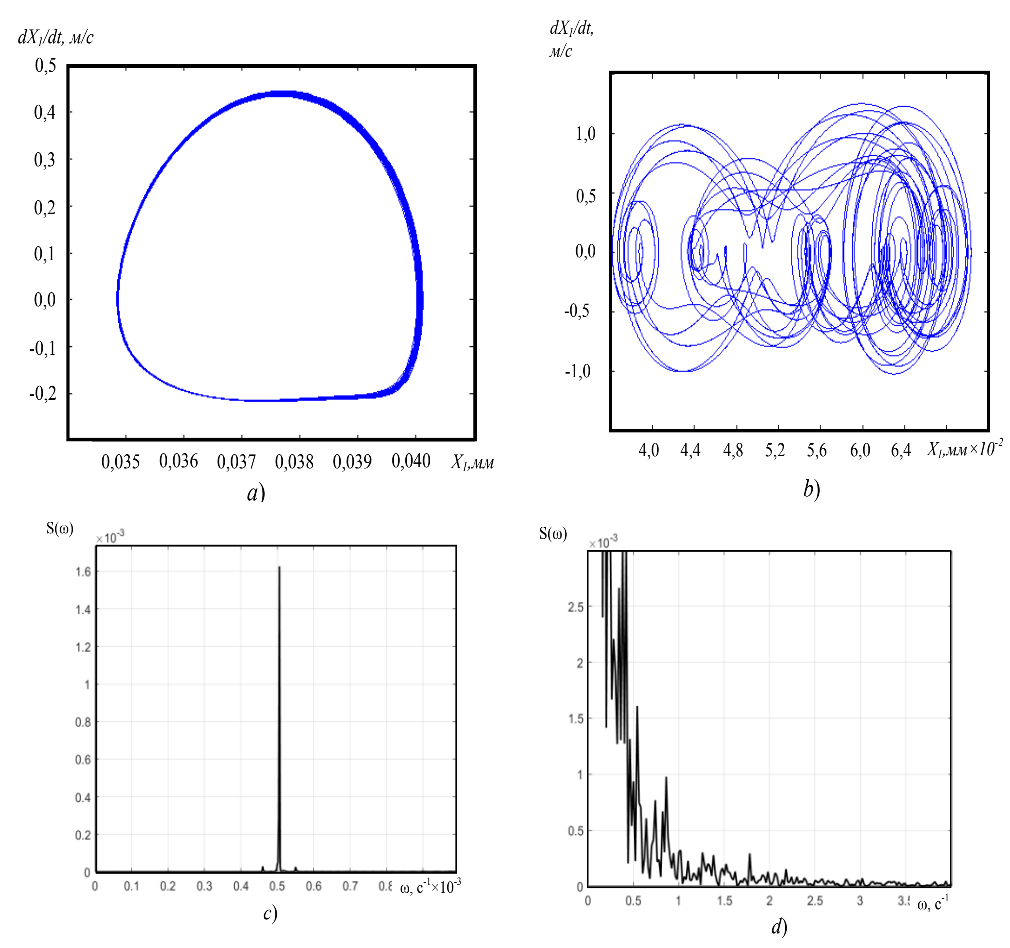


Рис. 3. Пример изменения фазовых траекторий и спектров деформационных смещений инструмента, соответствующих рис. 2 b и c

Fig. 3. Example of change in phase path and in tool deformation displacement spectra corresponding to fig. 2 b and c

Наконец, если еще увеличить амплитуду биений и параметр α_0, зависящий от угла α (рис. 2 с), то после бифуркаций удвоения периода наблюдается преобразование детерминированной динамики в хаотическую. Причем, хаос образуется в низкочастотной области. Это приводит к самопроизвольным изменениям макрорельефа поверхности и волнистости. На рис. 3 для двух режимов приведены фрагменты проекций фазовых траекторий деформационных смещений на плоскость ($X_1 - dX_1 / dt$), а также соответствующие спектры колебательных смещений. Как видно, устойчивые периодические движения на рис. 3 а, имеющие практически дельтообразный спектр (рис. 3 с), преобразуется в хаотические колебаний (рис. 3 b). Они имеют непрерывный спектр, расположенный в низкочастотной области (рис. 3 d). Размах хаотических колебаний возрастает в несколько раз. Важно подчеркнуть, что динамическая связь, формируемая в контакте задних граней с деталью, при малых биениях практически не влияет на динамические свойства процесса. Ее влияние становится заметным при увеличении амплитуды биений на величину, в нашем случае превышающую 0,01 мм. При дальнейшем ее увеличении рассматриваемая связь изменяет динамику. Система может потерять устойчивость за счет параметрического самовозбуждения. Даже в случае, если без биений равновесие является устойчивым, за счет биений не только теряется устойчивость, но и в окрестности равновесия формируется сложная динамика. Установлено, что, в зависимости от параметров системы и биений в окрестности равновесия формируются сложные колебания (инвариантные торы с периодически изменяющимися амплитудами, хаотические аттракторы), которые влияют на геометрическую топологию поверхности. Кроме этого, по мере увеличения амплитуды в области контакта задней грани с деталью выделяется дополнительная энергия. Не трудно показать, что в этом случае за счет циркуляционных сил существуют необратимые преобразования энергии механической системы, которая стимулирует процессы изнашивания инструмента.

При неизменных режимах углы в плане ϕ и ϕ^1 (рис. 1а) непосредственно влияют на устойчивость равновесия. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, при уменьшении ϕ наблюдается увеличение длины контакта режущего лезвия с деталью. Поэтому увеличивается склонность системы к потере устойчивости. Во-вторых, поворот системы координат вызывает изменение всех элементов матрицы h и c в (1). При этом меняется взаимное влияние колебательных смещений по различным направлениям. Принципиально можно выбрать такие повороты осей, при которых имеет место скаляризация динамических подсистем инструмента. Проанализируем изменение устойчивости в зависимости от угла ϕ. Угол ϕ^1 связан с ϕ геометрическим соотношением $\phi^1 = \pi / 2 - \phi$.

Для анализа устойчивости необходимо рассмотреть линеаризованное уравнение в вариациях относительно равновесия, представленного вектором $X^* = \{X_1^*, X_2^*, X_3^*, F_1^*, F_2^*, F_3^*\}^T$ [25]. Из (1)–(3) после замены $X_i(t) = x_i(t) + X_i^*, i = 1,2,3$ и $F_i(t) = f_i(t) + F_i^*, i = 1,2,3$ вычислим линеаризованное уравнение в вариациях

$$M\frac{d^2 z}{dt^2} + H\frac{dz}{dt} + Cz = 0\,, \tag{7}$$

где $z(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), f_1(t), f_2(t), f_3(t)\}^T$;

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \; C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} + \rho_0 \exp(-\alpha_0 V_{0,3} \cos\phi) & -1 & 0 & 0 \\ c_{1,2} + k_T \rho_0 \exp(\alpha_0 V_{0,3} \sin\phi) & c_{2,2} & c_{3,2} + k_T \rho_0 \exp(-\alpha_0 V_{0,3} \cos\phi) & 0 & -1 & 0 \\ c_{1,3} + \rho_0 \exp(\alpha_0 (V_{0,3} \sin\phi) & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 & 0 & -1 \\ \chi_1 \rho_{0,0} S_{P,\Sigma} & 0 & \chi_1 \rho_{0,0} t_{P,\Sigma} & 1 & 0 & 0 \\ \chi_2 \rho_{0,0} S_{P,\Sigma} & 0 & \chi_2 \rho_{0,0} t_{P,\Sigma} & 0 & 1 & 0 \\ \chi_3 \rho_{0,0} S_{P,\Sigma} & 0 & \chi_3 \rho_{0,0} t_{P,\Sigma} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} + \rho_0 \alpha_0 S_{P,\Sigma}^{(0)} \exp(-\alpha_0 V_{0,3} \cos\phi) & h_{2,1} & \Leftrightarrow \\ h_{1,2} + \rho_0 \alpha_0 k_T S_{P,\Sigma}^{(0)} \exp(-\alpha_0 V_{0,3} \cos\phi) & h_{2,2} & \Leftrightarrow \\ h_{1,3} & h_{2,3} & \Leftrightarrow \\ 0 & -\chi_1 \rho_{0,0} \alpha\mu S_P^{(0)} t_P^{(0)} [1 + \mu \exp(-\alpha V_{0,2})] tg\phi & \Leftrightarrow \\ 0 & -\chi_2 \rho_{0,0} \alpha\mu S_P^{(0)} t_P^{(0)} [1 + \mu \exp(-\alpha V_{0,2})] tg\phi & \Leftrightarrow \\ 0 & -\chi_3 \rho_{0,0} \alpha\mu S_P^{(0)} t_P^{(0)} [1 + \mu \exp(-\alpha V_{0,2})] tg\phi & \Leftrightarrow \end{bmatrix.}$$

$$\begin{matrix} \Leftrightarrow & h_{3,1} & -1 & 0 & 0 \\ \Leftrightarrow & h_{3,2} + \rho_0 \alpha_0 k_T t_{P,\Sigma}^{(0)} \exp(\alpha_0 V_{0,3} \sin\phi) & 0 & -1 & 0 \\ \Leftrightarrow & h_{3,3} + \rho_0 \alpha_0 t_{P,\Sigma}^{(0)} \exp(\alpha_0 V_{0,3} \sin\phi) & 0 & 0 & -1 \\ \Leftrightarrow & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \Leftrightarrow & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Leftrightarrow & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \Bigg] .$$

Для данных, приведенных в таблицах 2 и 3, прямым цифровым моделированием были определены области устойчивости при различных значениях угла φ и параметров радиальных биений (рис. 4). Когда биения отсутствуют, на устойчивость оказывают влияние свойства подсистемы инструмента и процесса резания определяемые, в основном, параметрами $\rho_{0,0}$ и T_P. Однако, как показывает система (7), не меньшее влияние имеет угол φ, от которого зависит длина режущего лезвия в контакте с зоной обработки. Эта длина не только изменяет коэффициент приращения сил, вызванных деформациями по направлению X_3, но и элементы матрицы скоростных коэффициентов, симметричная составляющая которых может стать отрицательно определенной и привести к потере устойчивости.

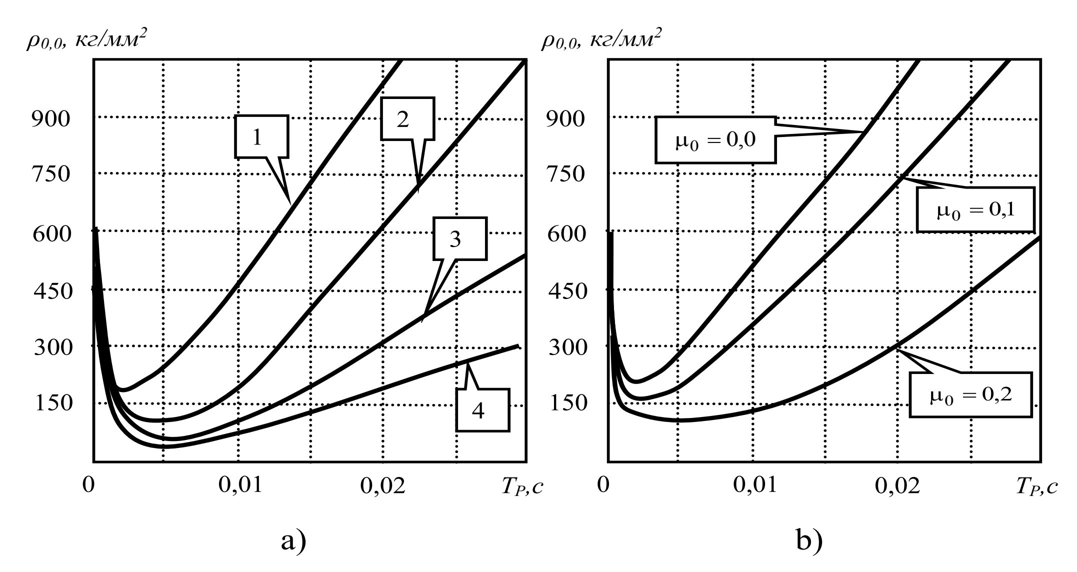


Рис. 4. Области устойчивости невозмущенной системы в плоскости «$\rho_{0,0}$ -T_P» (a) и возмущенной радиальными биениями с амплитудой μ_0 и углом φ=π/2 (b):1 — φ=π/2; 2 — φ=π/3; 3 — φ=π/4; 4 — φ=π/1,8

Fig. 4. Stability regions of unperturbed system in plane "$\rho_{0,0}$ *—*T_P*" (a) and perturbed by radial runout with amplitude* μ_0 *and angle* φ=π/2 (b): 1 – φ=π/2; 2 — φ=π/3; 3 — φ=π/4; 4 — φ=π/1.8

При наличии же биений в системе дополнительно образуются условия для параметрического самовозбуждения, которое, как показано ранее [18, 26, 27], зависит от частоты вращения шпинделя и уровня параметрического самовозбуждения. Здесь приведем лишь пример влияния уровня биений, оцениваемый параметром μ_0, на устойчивость (рис. 4. b).

Анализ результатов. При управлении процессом резания на станках, например, на основе использования систем ЧПУ, необходимо не только обеспечивать соответствие программы ЧПУ и траекторий движения исполнительных элементов станка, но и согласовать эти траектории с динамическими свойствами системы резания. Приведенные данные показывают, что одним из условий согласования является выбор геометрических параметров инструмента, при которых управляемые траектории являются асимптотически устойчивыми. Показано, что устойчивость зависит от геометрии инструмента, главным образом, от главного угла в плане ϕ и задних углов α и α^1. Показано, что при обработке инструментом с четырехгранными пластинками уменьшение главного угла в плане в диапазоне $\phi \in (0, \pi/2)$ вызывает непропорционально быстрое расширение области неустойчивости системы в параметрическом пространстве динамической связи, формируемой процессом резания. В свою очередь, параметрическое пространство математических моделей динамической связи определяется технологическими режимами, то есть программируемыми траекториями исполнительных элементов станка. Склонность системы к потере устойчивости резко возрастает и при значениях угла $\phi \rangle \pi/2$. При обработке инструментами с трехгранными пластинками диапазон допустимых вариаций главного угла в плане возрастает.

На допустимые изменения этого угла большое влияние оказывают биения шпиндельной группы. Даже незначительные биения с амплитудами $\Delta X_1 \langle 0,01\,мм$ при обработке четырехгранными пластинами с углами $\phi \rangle \pi/2$ приводят к резкому расширению области неустойчивости в параметрическом пространстве. Это обусловлено длиной контакта задней грани с деталью, которая при $\phi \rangle \pi/2$ определяется не величиной оборотной подачи, а длиной режущего лезвия. Поэтому в зависимости от величины биений оптимальное по устойчивости значение угла необходимо уменьшать. Наши исследования показывают, что при чистовом точении при биениях шпиндельной группы 0,01мм, оптимальные по устойчивости главные углы в плане при точении четырехгранными пластинками равны $\phi \in (80-85)^\circ$. При обработке трехгранными пластинками — $\phi \in (85-95)^\circ$. Причем значения углов большее 90° устанавливаются не только при обработке карманов, но и для уменьшения упругого отжима инструмента.

Если биения отсутствуют и равновесие устойчиво, то задние углы инструмента практически не влияют на динамику системы. В тех же случаях, когда по условиям обработки или состоянию станка наблюдаются условия, при которых имеют место сближения задних граней инструмента с деталью, величины задних углов имеют принципиальное значение. Как показано в материалах статьи, например, в зависимости от биений, за

счет периодического сближения задней грани инструмента с деталью формируются дополнительные силы, действующие на задние грани. Модель этих сил в координатах состояния не обладает потенциальными свойствами, поэтому на виртуальных перемещениях инструмента эти силы совершают работу. Это вызывает интенсификацию износа инструмента [28]. Кроме этого, сближение задних граней инструмента с деталью при периодических движениях инструмента, во-первых, приводит к образованию динамической постоянной составляющей деформационных смещений. Причем эта составляющая может возрастать со временем. Она непосредственно изменяет диаметр обрабатываемой детали. Во-вторых, в зависимости от параметров биений, в системе может формироваться хаотическая динамика деформационных смещений, которая отображается в геометрической топологии поверхности детали в виде нерегулярных изменений текущего диаметра и образования продольной и поперечной волнистости. Поэтому в зависимости от параметров биений, для устранения этого недостатка необходимо, во-первых, увеличивать задние углы инструмента. Во-вторых, ужесточать требование к величине критического износа инструмента, величина которого в динамических исследованиях имеет тот же эффект, что и уменьшение заднего угла. В условиях проведенных исследований при биениях шпиндельной группы 0,01мм величина задних углов не должна быть меньше (6–7)°. При этом значение износа по задней грани не должно превышать (0,3–0,4) мм. При выборе заднего угла необходимо учитывать дополнительные условия прочности инструмента и зависимости его изнашивания от этого угла. При увеличении биений требования к геометрическим параметрам инструмента ужесточаются.

Заключение. При создании систем управления процессами обработки на станках и выборе программы ЧПУ необходимо согласовывать управляемые траектории движения исполнительных элементов станка с динамическими свойствами процесса резания. Одним из путей такого согласования является выбор геометрических параметров инструмента, при которых при заданных биениях шпинделя и траекториях движения исполнительных элементов станка обеспечивается условие асимптотически устойчивости траекторий формообразующих движений инструмента относительно детали.

Библиографический список

1. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / Пер. с чешск. Москва : Машгиз, 1956. — 395 с.

2. Tlusty, J., Polacek, A., Danek, C. &Spacek, J. [1962] SelbsterregteSchwingungenanWerkzeugmaschinen (VEB VerlagTechnik, Berlin).

3. Tlusty, J. [2000] Manufacturing Processes and Equipment. (Prentice Hall, NJ).

4. Tobias, S. A. [1965] Machine Tool Vibrations (Blackie, London).

5. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва: Машиностроение, 1967. — 359 с.

6. Эльясберг, М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика / М. Е. Эльясберг. — Санкт-Петербург : ОКБС, 1993. — 182 с.

7. Вейц, В. Л. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок / В. Л. Вейц, Д. В. Васильков // СТИН. — 1999. — №6. — С. 9–13.

8.Stepan, G. [1998] Delay-differential equation models for machine tool chatter, in Nonlinear Dynamics of Material Processing and Manufacturing, ed. Moon,F. C. (John Wiley, NY) pp. 165–192.

9.G. Stepan, T. Insperge and R. Szalai [2005] Delay, Parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes / International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 15, No. 9 , p.p. 2783–2798.

10. Лапшин, В. П. Об одном частном случае синтеза систем управления процессом обработки металлов точением / В. П. Лапшин, Т. С. Бабенко, В. В. Христофорова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 75–84.

11. Воронов, С. А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей / С. А. Воронов, А. В. Непочатов, И. А. Киселев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2011. — № 1. — С. 50–62.

13. Васин, С. А. Синергетический подход к описанию природы возникновения и развития автоколебаний при точении / С. А. Васин, Л. А. Васин // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2012. — № 1. — С. 11–16.

14. Бородкин, Н. Н. Предотвращение процесса возникновения и развития автоколебаний при точении резцами со структурированными державками / Н. Н. Бородкин, С. А. Васин, Л. А. Васин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2014. — № 11–1. — С. 234–243.

15. Воронов, С. А. Нелинейные задачи динамики процессов резания / С. А. Воронов, И. А. Киселев // Машиностроение и инженерное образование. — 2017. — № 2 (51). — С. 9–23.

16. Заковоротный, В. Л. Влияние погрешности движения исполнительных элементов токарного станка на траектории формообразующих движений / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — № 1(88). — С. 35–46.

17. Gouskov, A. M., Voronov, S. A., Paris, H. & Batzer, S. A. [2002] Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / Commun. Nonlin. Sci. Numer. Simul., No**7**, p.p. 207–221.

18. J. Warminski, G. Litak, M. P. Cartmell, R. Khanin, M. Wiercigroch. [2003] Approximate analytical solutions for primary chatter in the non–linear metal cutting model / Journal of Sound and Vibration, No. 4, p.p. 917–933.

19. Бржозовский, Б. М. Управление динамикой резания по структуре упругого возмущения. / Б. М. Бржозовский, М. Б. Бровкова, И. Н. Янкин. // Станки и инструменты. — 2018. — №3 — С. 21–23.

20. Заковоротный, В. Л. Влияние биений шпиндельной группы на геометрическую топологию поверхности детали при токарной обработке / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Станки и инструменты. — 2018. —№ 4. — С. 35–40.

21. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В. Л. Заковоротный, [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11. № 2 (53). — С. 137–146.

22. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь). / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11. № 3 (54). — С. 301–311.

23. Remadna, M. and Rigal, J. [2006] Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 178, pp.67–75.

24. Бржозовский, Б. М. Управление системами и процессами. / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов. — Саратов: Сарат. гос. техн. ун–т. — 2008. – С. 137–142.

25. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. — Москва : Гостехиздат, 1950. — 494 с.

26.Маликов, А. А. Возникновение эмерджентного эффекта в процессе стружкообразования при точении резцами, оснащенными режущими пластинами с шариками на передней поверхности / А. А. Маликов, Л. А. Васин, Е. В. Плахатникова // Станки и инструменты. — 2018. — №5. — С. 9–12.

27. Brzhozovsky B.M., Yankin I.N., Brovkova M.B. [2005] Controlling the oscillatory process composition in machining by correcting the exciting force structure in the cutting zone / Procedia Engineering 2. Сер. "2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016" p.p. 241–246.

28. Заковоротный, В. Л. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки / В. Л. Заковоротный, Е. В. Бордачев // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1995. — № 3. — С. 95–103.

References

1. Tlusty, I. Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh. [Self-excitation vibrations in cutting machines.] Transl. from Czech. Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian).

2. Tlusty, J., Polacek, A., Danek, C. & Spacek, J. Selbsterregte SchwingungenanWerkzeugmaschinen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1962.

3. Tlusty, J. Manufacturing Processes and Equipment. Prentice Hall, NJ, 2000.

4. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965.

5. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Machine dynamics.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).

6. Elyasberg, M.E. Avtokolebaniya metallorezhushchikh stankov: Teoriya i praktika. [Self-oscillation of metal-cutting machine tools: Theory and practice.] St.Petersburg: OKBS, 1993, 182 p. (in Russian).

7. Veyts, V.L., Vasilkov, D.V. Zadachi dinamiki, modelirovaniya i obespecheniya kachestva pri mekhanicheskoy obrabotke malozhestkikh zagotovok. [Tasks of dynamics, modeling and quality assurance under machining of soft workpieces.] STIN, 1999, no. 6, pp. 9–13 (in Russian).

8.Stepan, G. Delay-differential equation models for machine tool chatter, in Nonlinear Dynamics of Material Processing and Manufacturing. Ed. Moon, F. C. John Wiley, NY, 1998, pp. 165–192.

9. Stepan, G., Insperge T. and Szalai, R. Delay, Parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783–2798.

10. Lapshin, V.P., Babenko, T.S., Khristoforova, V.V. Ob odnom chastnom sluchae sinteza sistem upravleniya protsessom obrabotki metallov tocheniem. [On a special case of synthesis of metal turning process control system.] Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no. 1 (88), pp. 75–84 (in Russian).

11. Voronov, S.A., Nepochatov, A.V., Kiselev, I.A. Kriterii otsenki ustoychivosti protsessa frezerovaniya nezhestkikh detaley / [Criteria for assessing the stability of milling nonrigid parts.] Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building, 2011, no. 1, pp. 50–62 (in Russian).

13. Vasin, S.A., Vasin, L.A. Sinergeticheskiy podkhod k opisaniyu prirody vozniknoveniya i razvitiya avtokolebaniy pri tochenii. [Sinergetic approach to description of occurance and development nature of self-oscillations in turning.] Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2012, no. 1, pp. 11–16 (in Russian).

14. Borodkin, N.N., Vasin, S.A., Vasin, L.A. Predotvrashchenie protsessa vozniknoveniya i razvitiya avtokolebaniy pri tochenii reztsami so strukturirovannymi derzhavkami. [Prevention of the emergence and development of self-oscillations in turning cutters with structural holders.] Izvestiya TulGU, 2014, no. 11–1, pp. 234–243 (in Russian).

15. Voronov, S.A., Kiselev, I.A. Nelineynye zadachi dinamiki protsessov rezaniya. [Nonlinear problems of cutting process dynamics.] Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie, 2017, no. 2 (51), pp. 9–23 (in Russian).

16. Zakovorotny, V.L., Gvindzhiliya, V.E. Vliyanie pogreshnosti dvizheniya ispolnitel'nykh elementov tokarnogo stanka na traektorii formoobrazuyushchikh dvizheniy. [Error effect of executive elements movement of the lathe tool on forming motion paths.] Vestnik of DSTU, 2017, no. 1(88), pp. 35–46 (in Russian).

17. Gouskov, A.M., Voronov, S.A., Paris, H. & Batzer, S A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. Commun. Nonlin. Sci. Numer. Simul., 2002, n.o**7**, .p. 207–221.

18. Warminski, J., Litak, G., Cartmell, M.P., Khanin, R., Wiercigroch, M. Approximate analytical solutions for primary chatter in the non–linear metal cutting model. Journal of Sound and Vibration, 2003, no. 4, pp. 917–933.

19. Brzhozovsky. B.M., Brovkova, M.B., Yankin, I.N. Upravlenie dinamikoy rezaniya po strukture uprugogo vozmushcheniya. [Control of cutting dynamics along the structure of an elastic perturbation.] Stanki Instrument, 2018, no. 3, pp. 21–23 (in Russian).

20. Zakovorotny, V.L., Gvindzhiliya, V.E. Vliyanie bieniy shpindel'noy gruppy na geometricheskuyu topologiyu poverkhnosti detali pri tokarnoy obrabotke. [Effect of spindle group wavering on the geometric topology of the workpiece surface under turning.] Stanki Instrument, 2018, no. 4, pp. 35–40 (in Russian).

21. Zakovorotny, V.L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (velocity coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 1, no. 2 (53), pp. 137–146 (in Russian).

22. Zakovorotny, V.L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya (pozitsionnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311 (in Russian).

23. Remadna, M. and Rigal, J. Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts. Journal of Materials Processing Technology, 2006, vol. 178, pp.67–75.

24. Brzhozovsky B.M., Martynov, V.V. Upravlenie sistemami i protsessami. [System and process control.] Saratov: Saratov St. Tech. Uni., 2008, pp. 137–142 (in Russian).

25. Lyapunov, A.M. Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya. [General problem on stability of motion.] Moscow: Gostekhizdat, 1950, 494 p. (in Russian).

26.Malikov, A.A., Vasin, L.A., Plakhatnikova, E.V. Vozniknovenie emerdzhentnogo effekta v protsesse struzhkoobrazovaniya pri tochenii reztsami, osnashchennymi rezhushchimi plastinami s sharikami na peredney poverkhnosti. [Origination of emergent effect in the process of chip formation under turning with cutters equipped with blade inserts with balls on the front face.] Stanki Instrument, 2018, no. 5, pp. 9–12 (in Russian).

27. Brzhozovsky B.M., Yankin I.N., Brovkova M.B. Controlling the oscillatory process composition in machining by correcting the exciting force structure in the cutting zone. Procedia Engineering 2. Ser. “2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016”, pp. 241–246.

28. Zakovorotny, V.L, Bordachev, E.V. Informatsionnoe obespechenie sistemy dinamicheskoy diagnostiki iznosa rezhushchego instrumenta na primere tokarnoy obrabotki. [Information support of the dynamic diagnostic system for cutting tool wear by the example of lathing.] Journal of Machinery Manufacture and reliability, 1995, no. 3, pp. 95–103 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.04.2018
Сдана в редакцию 15.04.2018
Запланирована в номер 30.04.2018

Received 15.04.2018
Submitted 15.04.2018
Scheduled in the issue 30.04.2018

Об авторах:

Заковоротный Вилор Лаврентьевич,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Гвинджилия Валерия Енвериевна,
магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-4604
sinedden@yandex.ru

Минаков Валентин Степанович,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор

Authors:

Zakovorotny, Vilor L.,
professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Gvindzhilya, Valeria E.,
Master of Sci. of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-4604
sinedden@yandex.ru

Minakov, Valentin S.
professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.021.056.55 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-214-222

Архитектура и реализация программы онлайн-тестировщика для проверки решений задач по олимпиадному программированию*

Е. В. Шагилова[1**]
[1]Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск, Российская Федерация

Architecture and implementation of online testing to check solutions to Olympiad programming problems***

E. V. Shagilova[1**]
[1]Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

Введение. Рассмотрена возможность автоматизации проверки работ участников олимпиад по программированию. Описана архитектура и работа серверной части системы проверки выполнения олимпиадных задач по программированию.
Материалы и методы. В качестве средств создания приложения были рассмотрены технологии MySQL, PHP, C++, JavaScript, HTML, CSS. Программа-тестировщик реализована на языке C++ для операционных систем семейства Windows NT.
Результаты исследования. Реализована возможность автоматизации проверки работ участников олимпиады в режиме реального времени. Для проверки олимпиадных работ по программированию разработана программа-тестировщик системы.
Обсуждение и заключения. В результате анализа функционирования глобальной сети Internet и технологии «клиент-сервер» были определены возможности для организации взаимодействия приложения с Internet-ресурсами. Разработанное приложение доказало целесообразность и эффективность организации взаимодействия приложения с Internet-ресурсами.

Introduction. The possibility of automated checking the works of participants of the Olympiads in programming is considered. The architecture and operation of the server part of the check system of performing the Olympiad programming tasks is described.
Materials and Methods. The technologies of MySQL, PHP, C ++, JavaScript, HTML, and CSS are considered as the application framework. The test program is implemented in C ++ for operating systems of the Windows NT family.
Research Results. The opportunity of the automated check of the Olympiad participants' works in a real-time mode is fulfilled. A program-tester of the system is developed to check the programming Olympiad works.
Discussion and Conclusions. As a result of the analysis of the global network and client/server technology operation, capabilities for the organization of interaction of the application with Internet-resources are defined. The developed application has proved expediency and efficiency of the interoperability of the application and Internet-resources.

Ключевые слова: онлайн-система, тестировщик, программирование, веб-сервер, интернет, протокол передачи данных.

Keywords: online system, tester, programming, web server, Internet, data transfer protocol.

Образец для цитирования. Шагилова, Е. В. Архитектура и реализация онлайн-тестировщика для проверки решений задач по олимпиадному программированию / Е. В. Шагилова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, № 2. — С.214–222. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-214-222

For citation: E.V. Shagilova. Architecture and implementation of online testing to check solutions to Olympiad programming problems. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 214–222. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-214-222

Введение. В настоящее время наблюдается тенденция роста количества различных соревнований по программированию. Одна из важных особенностей олимпиад по программированию — возможность автоматизации проверки работ участников. При этом возможна проверка и ранжирование участников в режиме реального времени. В связи с этим появляется необходимость разработки соответствующих решений. Автоматическое тестирование программных решений, обсуждается достаточно широко. На данный момент

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail:shagilova_elena@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

разработаны и успешно реализуются различные методики автоматического тестирования и программные продукты, основанные на их применении. Исследователи изучают различные аспекты реализации олимпиад по программированию. В ряде публикаций российских ученых [1–6] рассматривались вопросы автоматизированной генерации тестов для олимпиадных задач по программированию, обсуждались и описывались новые подходы к тестированию задач. Поднимаются проблемы совершенствования систем оценивания, основанных на автоматических проверках, а также встает задача разработки многофункционального многопользовательского инструментария [7–12].

Проведенный обзор литературы показал актуальность разработки программы онлайн-тестировщика для проверки решений задач по олимпиадному программированию. Поэтому цель представленной работы — разработка онлайн-системы для проверки решений задач по олимпиадному программированию. Проверка решений осуществляется в серверной части, под которой в данном контексте понимается программа-тестировщик (checker), которая осуществляет непосредственную проверку правильности решенной задачи.

На вход тестировщик получает исходный код проверяемой программы, имя компилятора и номер задачи, а также путь до конфигурационного файла, в котором описаны пути до тестов, ограничения по времени и памяти для проверяемой программы, а также настройки компиляторов. Тестировщик осуществляет компиляцию переданного исходного кода и проверку скомпилированного решения посредством сравнений с заранее подготовленными тестами, замеры времени выполнения и объема использованной памяти, а затем выносит вердикт о правильности переданного решения задачи.

Процесс создания пользовательского интерфейса — очень важный этап в разработке веб-приложения. Большинство создателей программного обеспечения уделяют большое внимание тому, чтобы пользователи чувствовали себя комфортно при работе с их приложениями. Именно поэтому одним из важнейших этапов создания программных средств является разработка и создание пользовательского интерфейса.

В работе рассмотрены основные этапы создания пользовательского интерфейса, серверной части и их взаимодействие внутри системы проверки олимпиадных работ по программированию, а также представлен конечный результат, то есть сама система с интерфейсом.

Материалы и методы

Основными средствами для реализации системы являются HTML, CSS, PHP, MySQL, JavaScript, Apache.

Установка системы начинается с установки веб-сервера. Для работы использовался Apache. Необходимо наличие на сервере установленного пакета Microsoft Visual Studio и FreePascal.

В данной работе реализованы возможности для проверки задач, написанных именно на языках программирования C++ и Pascal.

Программа-тестировщик реализована на языке C++ для операционных систем семейства Windows NT.

Постановка задачи

Необходимо разработать веб-приложение, отвечающее таким требованиям, как высокая нагруженность, интерактивность, низкое потребление ресурсов на стороне клиента, гибкость конфигурации, возможность проверки одной задачи неограниченным количеством тестов, неограниченность количества решений одной задачи, устойчивость к отказу одной из составляющих веб-приложения, географическая независимость места проведения олимпиады.

Высокая нагруженность означает, что система должна сохранять стабильную работку при работе с ней, по крайней мере, 100 человек. Для решения этой задачи применяется кластер какого-либо учебного заведения и правильное проектирование базы данных, а также всех элементов разрабатываемой системы.

Интерактивность предполагает постоянное взаимодействие с пользователем и быстрый отклик на все его действия. В частности, отображается таймер с оставшимся у участника олимпиады временем до окончания олимпиады, выводится подробная информация по каждой выполненной задаче (количество всех тестов и количество правильно пройденных тестов). Для этого используется технология AJAX.

Результаты исследования

Для проведения олимпиады на машинах с любыми техническими характеристиками было выбрано решение, при котором все вычисления происходят на стороне сервера, а клиенту отдается готовый результат всех вычислений. Иными словами, браузер является терминалом, отображающим полученную от сервера информацию.

Для уменьшения ограничений по установке системы была создана директория с конфигурационными файлами, позволяющая настраивать расположение модулей системы по усмотрению администратора, не задевая основную файловую систему сервера.

Также в конфигурационных файлах указывается количество задач и количество тестов и ответов к ним. Таким образом, система «знает» заранее как обрабатывать полученное от клиента решение определенной задачи и из этих же файлов «видит» сколько баллов начислить за каждый тест.

Система может быть доступна из любого места, где есть доступ в интернет. Она разворачивается на веб-сервере и осуществляет работу как обычный веб-сайт. Наглядно принцип работы системы представлен на рис. 1.

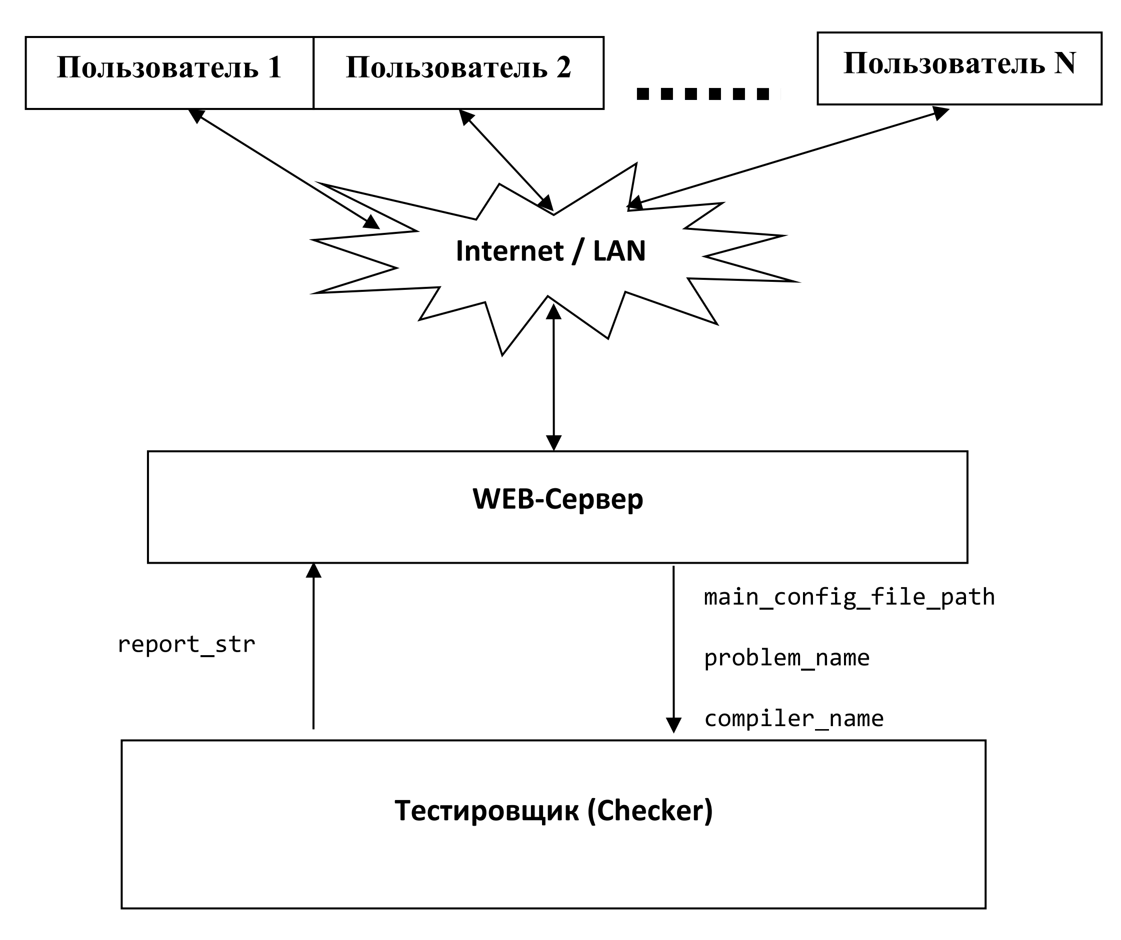


Рис. 1. Архитектура системы для онлайн-проверки решений задач по олимпиадному программированию

Fig. 1. System architecture for online checking solutions to Olympiad programming problems

Для того, чтобы система была устойчива к перебоям с доступом к интернету или электроэнергией, все данные в режиме реального времени вносятся в базу данных. Для этого у каждого из участников олимпиады есть заранее созданная учетная запись (логин и пароль, известный только ему).

Был выбран модульный подход к созданию системы. Это позволяет изменять, дорабатывать или фиксировать проблемы в каждой части системы, независимо от остальных. К примеру, если участник олимпиады присылает программу, в которой содержится код, вызывающий сбой в работе чекера, то прекратит свою работу и выдаст ошибку пользователю только лишь единственный процесс, запущенный для проверки задачи.

Описание чекера

Чекер — это программа, написанная на языке С++, находящаяся на сервере, которая занимается проверкой присланных решений.

Клиент обращается к web-серверу по протоколу прикладного уровня передачи данных HTTP через сеть Internet или LAN. Под клиентом понимается участник олимпиады или администратор web-сервера. Клиент входит в систему. Далее участник олимпиады получает возможность выбрать номер задачи, язык программирования и отправить файл с исходным кодом для проверки, после чего система сообщит результат. Если клиент является администратором, то он имеет возможность посмотреть список участников олимпиады, зарегистрировать новых участников, а также посмотреть ранжированные результаты олимпиады. Web-сервер

взаимодействует с программой тестировщик (checker) следующим образом: через аргументы командной строки тестировщику передаются следующие параметры в указанном порядке:

— main_config_file_path — путь до файла конфигураций, в котором описаны пути до тестов, ограничения по времени и памяти для проверяемой программы, а также настройки компиляторов. Это строка, в которой следует избегать пробелов.

— problem_name — имя или порядковый номер задачи. Это должна быть строка, содержащая только символы десятичных цифр, латинские буквы нижнего, латинские буквы верхнего регистра.

— compiler_name — имя компилятора. В настоящий момент поддерживаются компиляторы C++ и Pascal, поэтому это может быть строка: «pas» или «cpp».

— profile_path — путь до директории, в которой хранятся файлы текущего тестируемого пользователя по текущей задаче. Рекомендуется для каждого тестируемого пользователя создавать отдельную директорию, а внутри — отдельную поддиректорию для тестируемой задачи. Это строка, в которой следует избегать пробелов.

— source_name — имя файла тестируемого исходного кода. Это строка, содержащая имя файла тестируемого исходного кода. Файл исходного кода должен быть помещен внутри директории profile_path.

Таким образом, аргументы командной строки могут представлять, например, такую строку:

«C:\\checker\\main_config.txt 1 cpp C:\\checker\\users\\vitaly\\1 main.cpp».

Тестировщик, в свою очередь, формирует отчет по отправленной задаче:

— report_str — отчет по отправленной задаче — строка, выводимая программой тестировщик в стандартный поток вывода.

Грамматика report_str (для описания грамматики будет использоваться расширенная форма Бэкуса-Наура, разработанная Никлаусом Виртом):

```
report_str = "report" eol verdict.
verdict = compilation_error | (intervals ";" balls eol {test_id report eol}).
interval = integer " " | integer " - " integer " ".
intervals = interval {interval}.
balls = integer.
test_id = integer.
report = correct | incorrect | crash | tle | mle.
correct = "correct " time " " memory.
time = integer.
memory = integer.
incorrect = "incorrect".
crash = "crash".
tle = "tle".
mle = "mle".
compilation_error = "compilation_error" eol.
```

Пример отчета программы тестировщика по отправленной задаче:

```
report
1 - 2 5 7 - 10 ;60
1 correct 100 1806336
2 correct 105 1806336
3 mle
4 crash
5 correct 130 1807336
6 tle
7 correct 130 1807336
8 correct 130 1807336
9 correct 125 1807336
10 correct 125 1807336
```

В первой строке слово report говорит о начале отчета тестирующей программы по отправленному решению. Во второй строке указано, какие тесты пройдены и какие балы начислены за пройденные тесты. В конфигурационном файле указывается количество балов, которое соответствует каждому тесту, в случае, если он будет пройден. В последующих строках дана детальная информация по пройденным тестам. В случае, если тест пройден, то программа выводит correct, а также время и память, которая понадобилась проверяемой программе. Если превышено ограничение по памяти, то программа выводит mle. Если превышено ограничение по времени, то программа выводит tle. Если во время исполнения тестируемой программы произошел сбой, например, деление на ноль либо какой-то другой, приведший к аварийному завершению программы, то в отчете будет crash. Если не удалось скомпилировать полученный исходный код программы, то тестировщик выводит compilation_error, в этом случае информация о тестах выводиться не будет.

Из вышеописанной архитектуры можно сделать следующий вывод. Поскольку программа тестировщик является отдельным независимым компонентом системы в целом и по результатам своей работы она сообщает максимально полную информацию о тестируемом решении, то web-сервер может разрабатываться для большого разнообразия систем правил проведения олимпиад по программированию. Этот тестировщик подойдет как для правил ACM ICPC, так и для школьных олимпиад.

Программа checker состоит из четырех основных частей: заголовочного файла reader.h с его реализацией в reader.cpp — содержит функционал для чтения конфигурационных файлов и тестов, а также структуры хранения считанной информации; builder.h — содержит функционал для синтаксического анализа конфигурационных файлов, в которых описано, как использовать компиляторы, а также функционал, который отвечает за компиляцию переданных системе исходных файлов; executor.h — содержит функционал, отвечающий за запуск скомпилированных решений, мониторинг их работы по количеству использованной памяти и затраченного времени, а также структуры, описывающие результаты их работы; matcher.h — содержит функционал, отвечающий за сравнение правильных ответов для теста и тех, что вернула проверяемая программа.

Интерфейс системы

Интерфейс системы проверки олимпиадных задач должен быть максимально простым для того, чтобы не отвлекать участников от самих заданий и быть интуитивно понятным. По этой причине было принято решение отказаться от всех привычных элементов дизайна любого сайта и оставить только то, что необходимо для работы пользователя с системой.

Взаимодействие начинается с процесса авторизации пользователя в системе (рис. 2). Перед началом олимпиады подготавливается база данных, в которой есть все логины и пароли, которые раздаются участникам.

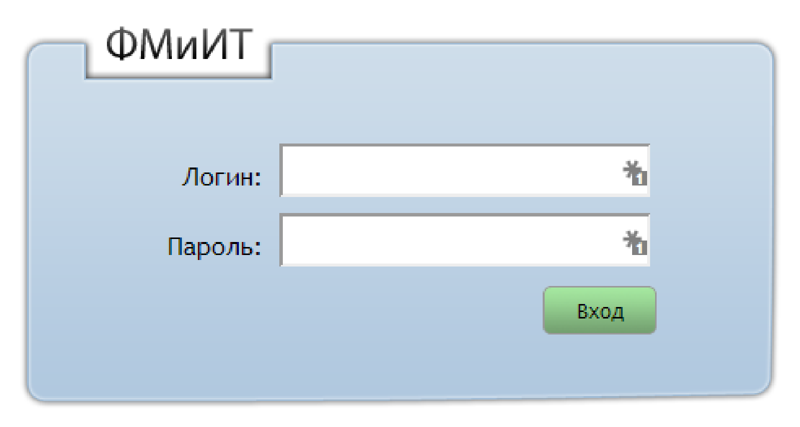


Рис. 2. Форма авторизации пользователя

Fig. 2. User authorization form

При правильном заполнении авторизационных данных появляется основной интерфейс системы (рис. 3). В нем содержится информация о количестве всех задач и времени до окончании олимпиады. Имеется возможность отключить ограничение по времени администратором.

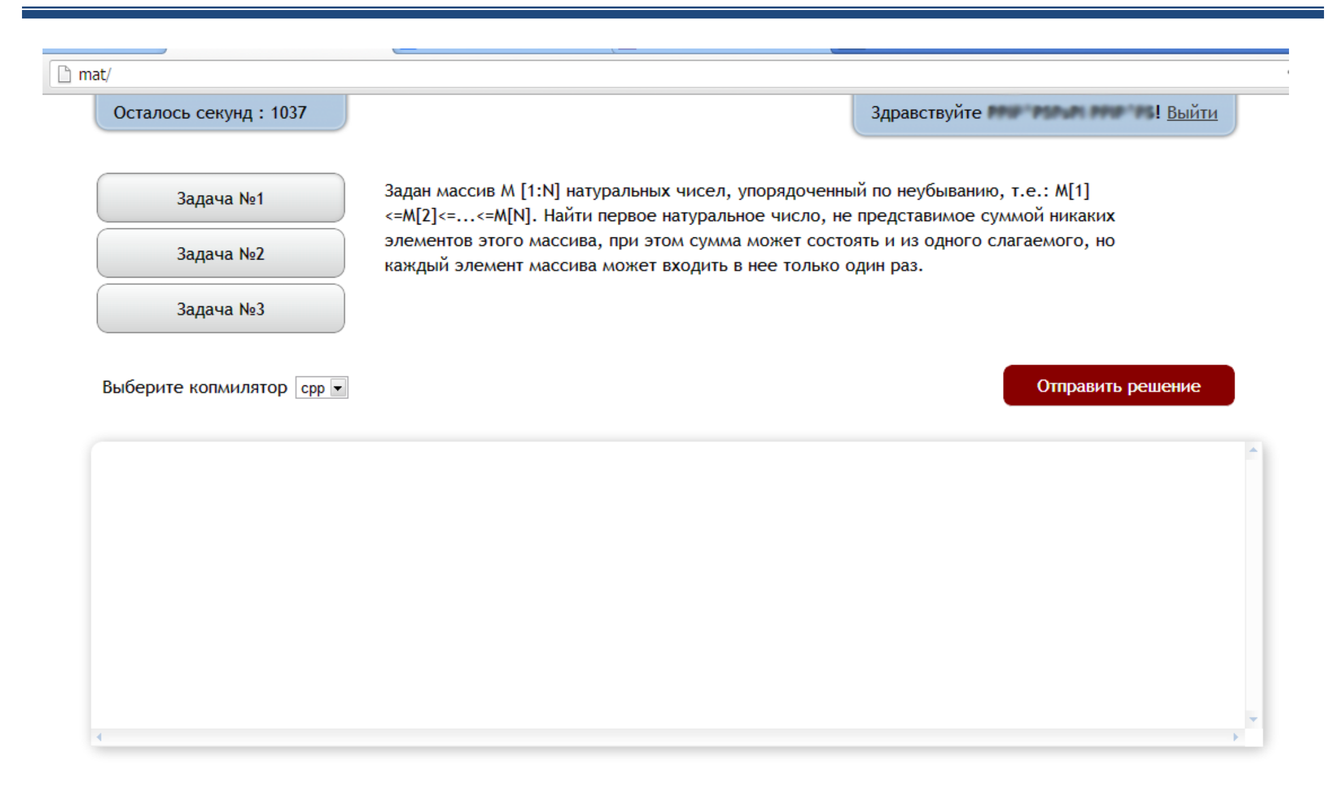


Рис. 3. Интерфейс пользователя

Fig. 3. User interface

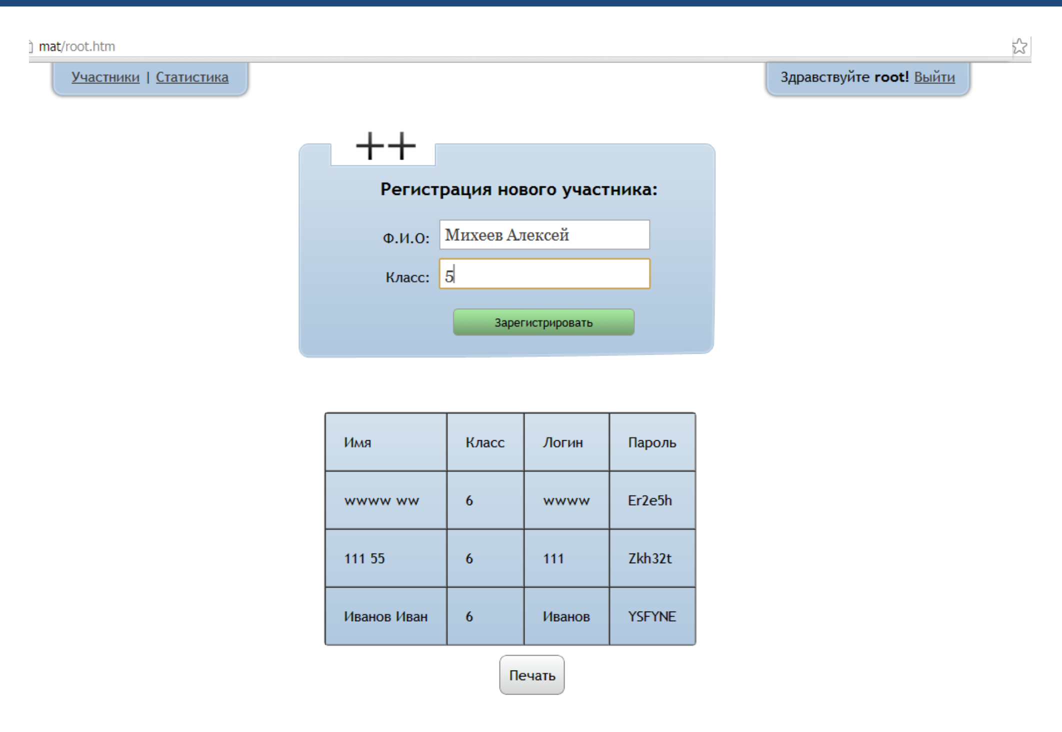
При клике на кнопки выбора задач в левой части происходит обновление блока с текстом задачи без перезагрузки всего интерфейса. Когда пользователь посчитает, что готов отослать решение на сервер, то он должен проверить правильно ли выбран компилятор. Это делается с помощью выпадающего списка, находящегося под блоком выбора задач. Затем нужно нажать на кнопку «Отправить решение». Это самый яркий элемент интерфейса системы, так как выделен красным цветом.

В самом низу находится поле, отображающее информацию по каждой задаче: общей сумме набранных баллов, общем количестве тестов и информация о правильности выполнения каждого из тестов.

По окончании выполнения олимпиады участник может завершить работу с системой с помощью кнопки «Выйти», находящуюся в правом верхнем углу интерфейса. Если произойдет попытка отправить решение после момента, когда закончится время, то система выдаст соответствующее предупреждение и обработка задачи не произойдет.

В мире веб-приложений существует проблема совместимости технологий, которыми описывается интерфейс, и программных средств, пытающихся его отобразить. Интерфейс, представленный в данной работе корректно отображается в браузерах Internet Explorer выше 8 версии, Firefox выше 15 версии, всех версиях Google Chrome и Opera Next, а также всех браузерах, построенных на ядре Chromium, например Яндекс браузер, Amigo от mail.ru и других.

Работа администратора с системой начинается с аналогичного окна авторизации, представленного на рис. 2. Затем появляется форма регистрации новых участников в системе (рис. 4). После заполнения нужных полей следует нажать на зеленую кнопку «Зарегистрировать» и участник окажется внесенным в базу данных. Этот способ добавления участников довольно медленный. Ниже описан более автоматизированный способ заполнения базы данных новыми пользователями.



Имя	Класс	Логин	Пароль
wwww ww	6	wwww	Er2e5h
111 55	6	111	Zkh32t
Иванов Иван	6	Иванов	YSFYNE

Рис. 4. Интерфейс администратора системы

Fig. 4. System administrator interface

После заполнения администратором базы данных появляется возможность распечатать данные об участниках и использовать их как раздаточный материал. Во время проведения самой олимпиады можно, нажав на кнопку «статистика», следить за успехами соревнующихся участников. После окончания олимпиады, нажав на эту же кнопку, будет предоставлена вся информация о результатах олимпиады в ранжированном по убыванию виде. Можно будет увидеть, кто и сколько тестов выполнил в каждой конкретной задаче и распечатать ее при необходимости.

По окончанию работы с веб-приложением администратору можно также, как и обычному пользователю, завершить сессию работы с системой с помощью кнопки «Выйти», находящейся в правом верхнем углу.

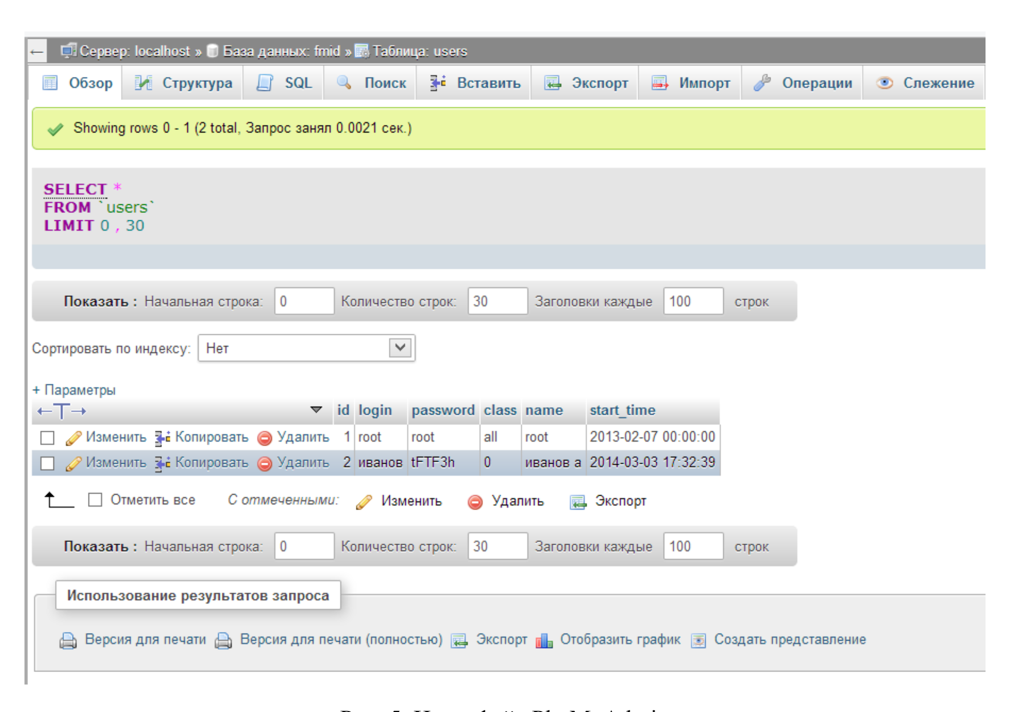


Рис. 5. Интерфейс PhpMyAdmin

Fig. 5. PhpMyAdmin interface

Для быстрого заполнения базы данными об участниках можно воспользоваться веб-приложением PhpMyAdmin (рис. 5). Обычно он является заранее установленным на веб-серверах, поэтому сложностей в его поисках возникать не должно. Чтобы автоматизировать процесс, необходимо составить SQL запрос, который сгенерирует все необходимые данные, за исключением логинов. Затем в интерфейсе, представленном на рис. 4, необходимо перейти на вкладку «SQL» и ввести запрос для таблицы «users».

Обсуждение и заключение

В данной работе рассмотрен процесс создания системы для проверки олимпиадных работ по программированию, этапы создания пользовательского интерфейса, серверной части и их взаимодействие внутри приложения.

Тестировать решения задач по программированию умеют многие сервисы, но все они имеют свои недостатки. Разрабатывая систему, представленную в этой работе, были приложены все усилия, чтобы избавиться от них. Она способна проверять правильность решения задач, представляемых Министерством образования РФ, а также подстраиваться под нужды школ, университетов и факультетов, для которых такие олимпиады являются неотъемлемой частью процесса обучения. Все основные типы контроля знаний (варианты ответа, множественный выбор, ответ-слово, ответ-текст, многовариантность задачи), все основные типы контроля правильности выполнения в системе есть.

Система устанавливается на сервере и при наличии внешнего IP у университета или школы способна принимать решения олимпиадных задач по протоколу http. Предусмотрена гибкая система назначения оценок, выстраивание рейтинга участников.

Имеется возможность проводить олимпиады одновременно в нескольких классах, давая каждому классу отдельный набор задач. В дополнение к этому можно ограничить время проведения олимпиады для каждого класса отдельно.

Администратор системы (организатор олимпиады) может в режиме онлайн видеть ход олимпиады, всех участников, а также знать, кто и сколько выполнил задач и сколько тестов в каждой из присланных задач.

В результате анализа функционирования глобальной сети Internet и технологии «клиент-сервер» были определены возможности для организации взаимодействия приложения с Internet-ресурсами.

Разработанное приложение доказало целесообразность и эффективность организации взаимодействия приложения с Internet-ресурсами. Тестировщик системы для проверки олимпиадных работ по программированию окажет значительную пользу как участникам, так и организаторам олимпиад.

Библиографический список

1. Буздалов, М. В. Генерация тестов для олимпиадных задач по программированию с использованием генетических алгоритмов / М. В. Буздалов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — № 2. — С. 72–77.
2. Корнеев, Г. А. Автоматическое тестирование решений на соревнованиях по программированию / Г. А. Корнеев, Р. А. Елизаров // Телекоммуникации и информатизация образования. — 2003. — № 1. — С. 61–73.
3. Назаренко, А. С. Аспекты автоматизации тестирования при проведении олимпиад по программированию / А. С. Назаренко, В. О. Скрипачёв // Информационные технологии в обеспечении федеральных государственных образовательных стандартов. — 2014. — № 3. — С. 147–151.
4. Евстропов, Г. О. Системы оценивания в задачах с автоматической проверкой на олимпиадах по программированию / Г. О. Евстропов // Информатика и образование. — 2016. — № 3 (272). — С. 65–67.
5. Макиева, З. Д. Проектирование автоматизированной системы проверки олимпиадных заданий по программированию / З. Д. Макиева // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2016. — Т. 38. — С. 54–61.
6. Иванова, С. А. Построение сервиса автоматизированной проверки решений задач по информатике «Информатик-ассистент» / С. А. Иванова, В. В. Иванов, Н. В. Николаева // Инновационные технологии в науке и образовании. — 2015. — № 4 (4). — С. 150–154.
7. Применение автоматизированной системы тестирования в учебном процессе / Е. Н. Боженкова [и.др.] // Новые информационные технологии в образовании (НИТО-Байкал). — 2010. — № 2. — С. 161–163.
8. Сверчкова, Г. В. Автоматизированная система проверки результатов олимпиады по программированию / Г. В. Сверчкова, Д. И. Кислицын // Сборник статей студ., аспирантов и магистр. «Информационные системы и технологии». — 2016. — С. 30–34.
9. Рогачева, Е. В. Опыт использования систем автоматизированной проверки решений при обучении программированию / Е. В. Рогачева // Высшая школа. — 2015. — № 9. — С. 55–58.
10. Самощенко, Ю. Ю. Исследование эффективности автоматизированной проверки решений при проведении олимпиад по программированию / Ю. Ю. Самощенко // Молодой ученый. — 2016. — № 11. — С. 223–226.

11. Автоматизированная система тестирования программ / В. А. Соловьев [и др.] // Электронные средства и системы управления. — 2012. — № 1. — С. 188–191.

12. Автоматизированная система тестирования программ / С. А. Черепанов [и.др.] // Электронные средства и системы управления. — 2014. — № 2. — С. 61–65.

References

1. Buzdalov, M.V. Generatsiya testov dlya olimpiadnykh zadach po programmirovaniyu s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov. [Tests generation for Olympiad programming tasks using genetic algoritms.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2011, no. 2, pp. 72–77 (in Russian).

2. Korneev, G.A., Yelizarov, E.A. Avtomaticheskoe testirovanie resheniy na sorevnovaniyakh po programmirovaniyu. [Automatic testing of solutions on programming competitions.] Telekommunikatsii i informatizatsiya obrazovaniya, 2003, no. 1, pp. 61–73 (in Russian).

3. Nazarenko, A.S., Skripachev, V.I. Aspekty avtomatizatsii testirovaniya pri provedenii olimpiad po programmirovaniyu. [Aspects of testing automation during the programming Olympiads.] Informatsionnye tekhnologii v obespechenii federal'nykh gosudarstvennykh obrazovatel'nykh standartov. [Information technologies in providing Federal state educational standards.] 2014, no. 3, pp. 147–151 (in Russian).

4. Yevstropov, G.O. Sistemy otsenivaniya v zadachakh s avtomaticheskoy proverkoy na olimpiadakh po programmirovaniyu [Assessment systems in problems with automatic testing in Olympiads on programming.] Informatics and Education, 2016, no. 3 (272), pp. 65–67 (in Russian).

5. Makieva, Z.D. Proektirovanie avtomatizirovannoy sistemy proverki olimpiadnykh zadaniy po programmirovaniyu. [Development of the automated verification system for programming Olympiad tasks.] Journal Kyrgyz State Technical University after I. Razzakov , 2016, vol. 38, pp. 54–61 (in Russian).

6. Ivanova, S.A., Ivanov, V.V., Nikolaeva, N.V. Postroenie servisa avtomatizirovannoy proverki resheniy zadach po informatike «Informatik-assistent» [Construction of service for automated verification of solutions to computer science problems "Information scientist-Assistant".] Innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii, 2015, no. 4 (4), pp. 150–154 (in Russian).

7. Bozhenkova, E.N., et al. Primenenie avtomatizirovannoy sistemy testirovaniya v uchebnom protsesse. [Application of the automated testing system in the educational process.] Novye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii (NITO-Baykal). [New information technologies in education (NITO-Baikal).] 2010, no. 2, pp. 161–163 (in Russian).

8. Sverchkova, G.V., Kislitsyn, D.I. Avtomatizirovannaya sistema proverki rezul'tatov olimpiady po programmirovaniyu. [Automated system for checking results of programming Olympiad.] Информационные системы и технологии. — 2016. — № 3. — С. 30–34 (in Russian).

9. Rogacheva, E.V. Opyt ispol'zovaniya sistem avtomatizirovannoy proverki resheniy pri obuchenii programmirovaniyu. [Experience in the use of automated solutions testing systems for programming education.] Vysshaya shkola, 2015, no. 9, pp. 55–58 (in Russian).

10. Samoshchenko, Y.Y. Issledovanie effektivnosti avtomatizirovannoy proverki resheniy pri provedenii olimpiad po programmirovaniyu. [Study on automated verification efficiency of solutions during programming Olympiads.] Young Scientist, 2016, no. 11, pp. 223–226 (in Russian).

11. Solovyev, A., et al. Avtomatizirovannaya sistema testirovaniya programm. [Automated system for testing programs.] Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. [Electronic means and control systems.] 2012, no.1, pp. 188–191 (in Russian).

12. Cherepanov, S.A., et al. Avtomatizirovannaya sistema testirovaniya programm. [Automated system for testing programs.] Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. [Electronic means and control systems.] 2014, no. 2, pp. 61–65 (in Russian).

Поступила в редакцию 14.03.2018
Сдана в редакцию 18.03.2018
Запланирована в номер 15.05.2018

Received 14.03.2018
Submitted 18.03.2018
Scheduled in the issue 15.05.2018

Об авторе:

Шагилова Елена Викторовна,
доцент кафедры фундаментальной информатики, Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), кандидат педагогических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0267-6082
shagilova_elena@mail.ru

Author:

Shagilova, Elena V.
associate professor of the Fundamental Informatics Department, Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, Russia), Cand.Sci. (Pedagogics), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0267-6082
shagilova_elena@mail.ru

Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2, с. 223–229
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 223–229



УДК 004.023 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-223-229

Исследование модифицированной модели Уитли с различным количеством и различными методами формирования элитных особей *

Н. С. Кривошей [1], В. Г. Кобак [2]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on modified Whitley model with different number and various methods of forming elite individuals ***

N. S. Krivoshey[1], V. G. Kobak[2]**
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Представлен сравнительный анализ решений модифицированной модели Уитли при различных способах формирования элитных особей. В данном исследовании для формирования элитных особей используются алгоритмы Крона и Плотникова-Зверева. Целями работы являлись разработка модифицированной модели Уитли с применением алгоритмов Крона и Плотникова-Зверева для формирования элитных особей, а также программного средства для решения задачи теории расписаний. Необходимо было получить лучшее решение этой задачи при различных исходных данных с последующей обработкой результатов и выявлением модификации модели Уитли. Описана задача, которая подразумевает поиск оптимального распределения работ по процессорам с минимизацией максимального времени выполнения работ.
Материалы и методы. Приведено описание всех алгоритмов, которые были реализованы при разработке программного средства решения задачи оптимизации построения расписания. Разработаны следующие алгоритмы: модифицированная модель Уитли, применение стратегии элитизма, алгоритм Крона, алгоритм Плотникова-Зверева.
Результаты исследования. Разработано программное средство, с помощью которого проведён вычислительный эксперимент при различных исходных данных, с использованием одной, двух, трёх и четырёх элитных особей. Вычислительный эксперимент проведён для наиболее распространённых наборов данных при различном количестве элитных особей. Каждая модификация модели Уитли запускалась сто раз с каждым набором исходных данных. В результате сравнительного анализа было выявлено, какое влияние оказывает использование рассмотренных стратегий элитизма в разработанных модификациях генетического алгоритма (модели Уитли) на точность решения однородной минимаксной задачи при различном количестве элитных особей.
Обсуждение и заключения. Определены лучшие результаты работы алгоритмов, выявлена эффективность применения элитизма в модифицированной модели Уитли при

Introduction. A comparative analysis of the modified Whitley model solutions through different methods of forming elite individuals is presented. The algorithms of Kron and Plotnikov-Zverev are used in the study for the formation of elite individuals. The work objectives are the development of the modified Whitley model involving the Kron's and Plotnikov-Zverev's algorithms to form elite individuals, as well as a software tool for solving the scheduling theory problem. It was necessary to obtain the best solution to this problem with various initial data followed by processing the results and identifying a modification of the Whitley model. The distribution problem which implies the search for the optimal distribution of work to the processors with the minimization of the maximum execution time is described.
Materials and Methods. All the algorithms implemented under the development of the software tool for solving the optimization scheduling problem are considered. The following algorithms are presented: the modified Whitley model, the application of the elitism strategy, the Kron's algorithm, the Plotnikov-Zverev's algorithm.
Research Results. A software tool is developed. It was applied to conduct a computational experiment with various initial data using one, two, three, and four elite individuals. The experiment was carried out for the most common data sets with a different number of elite individuals. Each Whitley model modification was launched a hundred times with each set of the source data. The comparative analysis of the results shows how the application of the considered elitism strategies in the developed modifications of the genetic algorithm (Whitley model) affects the accuracy of the solution to the homogeneous minimax problem with a different number of elite individuals.
Discussion and Conclusions. The best results of the algorithms are determined; the utilization of elitism in the modified Whit-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: krins.work@gmail.com, valera33305@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

решении однородной минимаксной задачи теории расписаний. Проведено сравнение результатов работы алгоритма при одной, двух, трёх и четырёх элитных особях.

ley model when solving a homogeneous minimax problem of scheduling theory is estimated. The algorithm results are compared for one, two, three and four elite individuals.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, модифицированная модель Уитли, элитизм, теория расписаний, алгоритм Крона, алгоритм Плотникова-Зверева, NP-полные задачи, однородная минимаксная задача, эвристические алгоритмы, вычислительный эксперимент.

Keywords: genetic algorithms, modified Whitley model, elitism, scheduling theory, Kron's algorithm, Plotnikov-Zverev's algorithm, NP-complete problems, homogeneous minimax problem, heuristic algorithms, computational experiment.

Образец для цитирования: Кривошей, Н. С. Исследование модифицированной модели Уитли с различным количеством и различными методами формирования элитных особей / Н. С. Кривошей, В. Г. Кобак // Вестник Дон. гос. ун-та. — 2018. — Т.18, № 2. — С.223–229 DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-223-229

For citation: N. S. Krivoshey, V. G. Kobak· Study on modified Whitley model with different number and various methods of forming elite individuals. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 223–229. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-223-229

Введение. Одними из наиболее часто решаемых задач теории расписаний являются NP-полные задачи. Для них практически невозможно подобрать решение за полиноминально быстрое время [1]. Так как в последние годы все более широкое распространение получают многопроцессорные, многомашинные вычислительные комплексы, объединённые в единую вычислительную систему, необходимость поиска наилучшего распределения заданий между процессорами является актуальной и обосновывается возможностью существенной экономии машинного времени. Теоретическая сложность нахождения наилучшего распределения связана с решением экстремальных задач комбинаторного типа, требующих больших вычислительных ресурсов. Генетические алгоритмы, моделирующие эволюционные процессы, являются перспективным способом решения подобных задач [2]. Основным механизмом эволюции является сочетание генетического механизма передачи наследственности, механизма мутаций, обеспечивающих разнообразие видов, и естественного отбора, который обеспечивает с течением времени формирование особей популяции, наиболее приспособленных для данной среды. Более приспособленные особи имеют большую вероятность передать свою наследственную информацию. Наследственная информация в виде хромосомы полностью определяет развитие особи в ее жизненном цикле, и с помощью обмена генами хромосом происходит передача наследственной информации потомкам. Случайные изменения в генофонд вносятся во время мутаций, если новые признаки увеличивают приспособленность особи, то такие признаки скорее всего закрепятся и перейдут к потомкам [3].

Применение стратегии элитизма позволяет дополнительно увеличить скорость схождения алгоритма и, во многих случаях, точность решения [4]. Хотя сама концепция элитизма по сей день является спорной из-за возможности обнаружения алгоритмом решения в локальном экстремуме, во многих случаях она оправдана, и эти случаи можно определить путём сравнения результатов с результатами алгоритма без элитизма в тех же исходных условиях. Обычно в качестве элитной особи выбирается особь с наилучшим значением целевой функции, а модификации алгоритма с применением различных способов формирования элит изучены крайне мало.

Постановка задачи. В вычислительную систему (ВС) из N несвязанных идентичных устройств: $P = \{p_1, p_2,..., p_n\}$ поступает набор из M независимых параллельных заданий: $T = \{t_1, t_2,..., t_m\}$. Известно время решения $\tau(t_i)$ задания t_i. При этом каждое задание может выполняться на любом из устройств. В каждый момент времени отдельный процессор обслуживает не более одного задания, выполнение задания не прерывается для передачи на другой процессор. Требуется найти такое распределение заданий по процессорам, при котором суммарное время выполнения заданий на каждом из процессоров было бы минимальным.

Для решения этой задачи хорошо подходят генетические алгоритмы [1, 2]. В данной работе рассматривается решение задачи с помощью модифицированной модели Уитли с использованием элитизма. Комплектование элитных особей реализовывается несколькими различными способами. Задача решается для различных значений параметров M, N и постоянного диапазона времени выполнения заданий.

Краткое описание алгоритмов. Рассматриваемый в данной статье генетический алгоритм (ГА) был описан Уитли (D. Whitley) [5]. Он отличается от классического ГА следующими тремя свойствами:

- На каждой итерации только одна случайная родительская пара создает одного потомка.
- Ребенок заменяет собой не своего родителя, а одну из наименее приспособленных особей в популяции (первоначально — наихудшую).
- Отбор особи для замены производится по ее ранку (рейтингу), а не по приспособленности.

Таким образом, алгоритм включает следующие шаги:

1. Формирование начального поколения;

2. Пропорциональный отбор и последующее применение генетических операторов (в данной модификации — это одноточечная мутация и одноточечный кроссовер с выбранной вероятностью);
3. Проверка условия останова алгоритма (если неуспешна, переход на шаг 2);
4. Лучшая особь является решением задачи.

В исследуемой модификации алгоритм завершает работу, если в течение заданного количества поколений не происходит никаких улучшений показателей приспособленности.

В разработанной в рамках исследования модифицированной модели алгоритма Уитли применяется стратегия элитизма. Элита — это лучшая по приспособленности особь текущего поколения, переходящая в следующее поколение без изменений, она не участвует в селекции и последующем скрещивании [6, 7].

Алгоритм Крона. Принцип работы данного алгоритма заключается в случайном распределении всех заданий на множество процессоров, вычислении общего времени загрузки по каждому процессору $\{Ti\}(i=1..n)$ и выполнении обмена заданиями между процессорами с максимальным $Tmax$ и минимальным $Tmin$ значениями из набора $\{Ti\}$ при выполнении условия $|qkmax - qjmin| < D$, где $D = Tmax - Tmin$, $k, j = 1,2..m$. После каждой из операций обмена значения $\{Tk\}$ пересчитываются, снова выбираются два процессора с $Tmax$ и $Tmin$ и алгоритм проверки описанного выше условия повторяется. Алгоритм завершится, когда условие ни разу не выполнится [8, 9]. Таким образом, первый этап алгоритма включает шаги:

1. Генерация случайного числа pi — номер прибора равномерно распределённого на интервале $[1,N]$. Инициализация $j = 1$.

2. Назначение на прибор с номером pi j-ого задания. Увеличение счётчика $j = j + 1$.

3. Проверка, является ли значение j большим, чем количество заданий M, если условие выполняется, то завершить распределение, иначе перейти к шагу 1.

Второй этап включает следующие шаги:

1. Вычисление времени загрузки каждого процессора $\{Tj\}$ $(j = 1,..,N)$ путем суммирования времен выполнения заданий загруженных в каждый j-й прибор.

2. Из итогового множества $\{Tk\}$ выбираются номера процессоров с максимальным $Tmax$ и минимальным $Tmin$ значениями из $\{Tk\}$ соответственно.

3. Для каждого из процессоров с минимальной и максимальной загрузкой проверяется условие по принципу каждый с каждым: $tkmax – tlmin < \Delta$, где $\Delta = Tmax - Tmin$, $k,l = 1,.., M$. При этом $tkmax > tlmin$.

Если оно выполняется, то происходит переход к следующему шагу, а иначе выполнение алгоритма прекращается.

4. Обмен значения tk и tl местами и переход к шагу 1.

Блок схема алгоритма представлена на рис. 1.



Рис.1. Блок-схема алгоритма Крона / *Fig. 1. Flowchart of Kron's algorithm*

Алгоритм В. Н. Плотникова-В. Ю. Зверева. Широкое распространение имеют простые и достаточно эффективные списочные алгоритмы построения расписаний, основанные на эвристических алгоритмах. Одним из них является алгоритм, предложенный В. Н. Плотниковым и В. Ю. Зверевым. Это приближенный метод для поиска близкого к оптимальному решению, использующий минимаксный критерий [10]. Он выключает следующие шаги:

1. Упорядочить строки матрицы по убыванию сумм всех элементов строки

$$\sum_{j=1}^{n}(\tau(t_1 p_j)) \geq \sum_{j=1}^{n}\left(\tau(t_2 p_j)\right) \geq \cdots \geq \sum_{j=1}^{n}\left(\tau(t_m p_j)\right).$$

2. В преобразованной матрице выделить первую строку i=1 и найти в ней $min(\tau\ (t_1\ p_j))$ — минимальный элемент. Этот элемент принимается за элемент распределения и прибавляется к соответствующему элементу второй строки $min(\tau\ (t_1\ p_j))+ (\tau\ (t_2\ p_j))$.

3. Вторая строка теперь учитывает предыдущее решение. Из нее выбирается минимальный $min(\tau\ (t_2\ p_j))$, нужно прибавить его к соответствующему элементу третьей строки $min(\tau\ (t_2\ p_j))+ (\tau\ (t_3\ p_j))$ и т.д., в результате получим матрицу T_τ''.

4. На выполнение передаётся минимальный элемент строки $min(\tau''\ (t_i\ p_j))$, такой что $min(\tau\ (t_i\ p_j)) \neq 0$.

Данный алгоритм отличается наибольшим по сравнению с точными быстродействием, простотой и позволяет получить приемлемые по точности решения [10]. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма Плотникова-Зверева

Fig. 2. Flowchart of Plotnikov-Zverev's algorithm

Результаты исследования. Аналитическое определение степени влияния способа формирования элитных особей на результат работы генетического алгоритма не представляется возможным, поэтому с помощью программного обеспечения, реализованного в среде Microsoft Visual Studio 2012 на языке Visual C++, был проведен вычислительный эксперимент.

Разработаны 3 модификации модели Уитли:

1. Элитой полагается лучшая особь исходного поколения;
2. Элита формируется алгоритмом Крона;
3. Элита формируется алгоритмом Плотникова-Зверева.

Массив заданий случайным образом генерируется из заданного диапазона значений (20–30). Вероятности кроссовера и мутации равны 100%. Условие остановки (количество поколений с неизменным Tmax) — 10. Эксперимент был проведён для наиболее часто встречающегося количества процессоров (N) — 2–4 и количества задач (M) — 19, 119, 519. Результаты работы при 1–4 элитных особях приведены в таблицах 1–4. *Tmaxm* — среднее значение из 100 повторений алгоритма.

Таблица 1
Table 1

Средние значения Tmax (1 элита)

Average values of Tmax (1 elite)

M	N	Алг. Плотникова-Зверева		Алг. Крона		Лучшая особь	
		Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c
19	2	241,55	0,007	241,03	0,009	245,25	0,005
	3	167,81	0,006	165,19	0,013	168,34	0,006
	4	124,19	0,008	124,57	0,012	125,25	0,005
119	2	1520,14	0,025	1517,62	0,051	1519,91	0,035
	3	1014,28	0,070	1014,75	0,081	1016,79	0,039
	4	767,33	0,051	766,98	0,073	769,19	0,030
519	2	5510,22	0,199	5513,19	0,211	5517,09	0,105
	3	4409,15	0,179	4409,99	0,199	4416,21	0,109
	4	3325,71	0,199	3324,99	0,407	3325,97	0,149

Таблица 2
Table 2

Средние значения Tmax (2 элиты)

Average values of Tmax (2 elites)

M	N	Алг. Плотникова-Зверева		Алг. Крона		Лучшая особь	
		Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c
19	2	240,52	0,007	240,07	0,011	242,29	0,005
	3	161,31	0,006	162,11	0,013	162,54	0,006
	4	122,59	0,007	122,57	0,014	123,25	0,006
119	2	1520,44	0,028	1518,69	0,057	1520,94	0,041
	3	1012,22	0,087	1012,72	0,089	1025,72	0,042
	4	763,31	0,056	763,93	0,093	764,15	0,035
519	2	5509,25	0,211	5508,02	0,261	5510,09	0,111
	3	4406,55	0,176	4407,96	0,237	4407,91	0,117
	4	3318,75	0,195	3317,95	0,426	3318,98	0,145

Таблица 3
Table 3

Средние значения Tmax (3 элиты)

Average values of Tmax (3 elites)

M	N	Алг. Плотникова-Зверева		Алг. Крона		Лучшая особь	
		Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c
19	2	242,85	0,006	242,53	0,009	242,85	0,006
	3	168,88	0,006	168,18	0,017	168,94	0,006
	4	125,15	0,008	126,58	0,015	127,95	0,006
119	2	1524,16	0,027	1514,12	0,058	1516,31	0,036
	3	1016,26	0,075	1016,25	0,071	1019,19	0,036
	4	767,31	0,055	767,18	0,079	768,69	0,038
519	2	5515,24	0,193	5515,18	0,251	5517,19	0,115
	3	4409,96	0,178	4409,91	0,199	4410,25	0,106
	4	3326,76	0,159	3326,95	0,409	3326,99	0,141

Таблица 4
Table 4

Средние значения Tmax (4 элиты)

Average values of Tmax (4 elites)

M	N	Алгоритм Плотникова-Зверева		Алгоритм Крона		Лучшая особь	
		Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c	Tmaxm	t, c
19	2	243,43	0,007	242,73	0,009	245,24	0,006
	3	168,78	0,006	167,15	0,011	168,39	0,006
	4	126,15	0,009	126,27	0,011	126,29	0,005
119	2	1525,17	0,026	1524,68	0,031	1525,34	0,022
	3	1017,27	0,049	1017,96	0,081	1017,29	0,034
	4	769,35	0,037	767,93	0,071	771,49	0,034
519	2	5512,21	0,159	5510,59	0,201	5515,44	0,185
	3	4415,13	0,158	4411,09	0,161	4415,29	0,169
	4	3327,77	0,168	3329,19	0,372	3331,47	0,209

Заключение. Из полученных результатов видно, что средние значения *Tmax*, полученные с использованием алгоритмов Крона и Плотникова-Зверева для формирования элиты, во всех случаях являются лучшими по отношению к результатам работы алгоритма с обычным элитизмом. С увеличением количества элит эффективность алгоритма Крона становится более выраженной, при этом время работы генетического алгоритма увеличивается не слишком существенно.

Библиографический список

1. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен [и др.]. — Москва : Вильямс, 2013. — 1328 с.

2. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. — Москва: Физматлит, 2006. — 320 с.

3. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. — Москва : Физматлит, 2003. — 432 с.

4. Чернышев, Ю. О. Адаптивный генетический алгоритм для решения задач оптимизации на основе стратегии элитизма / Ю. О. Чернышев, А. Ю. Полуян // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. — 2008. — № 4 (81). — С. 36–39.

5. Whitley, D. A genetic algorithm tutorial / Computer science department, Colorado State University. — Режим доступа: https://www.cs.colostate.edu/pubserv/pubs/Whitley-genitor-MiscPubs-tutorial.pdf (дата обращения: 20.10.2017).

6. Пантелеев, А. В. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы / А. В. Пантелеев, Д. В. Метлицкая, Е. А. Алешина. — Москва : Вузовская книга, 2013. — 244 с.

7. Пантелеев, А. В. Применение эволюционных методов глобальной оптимизации в задачах оптимального управления детерминированными системами / А. В. Пантелеев. — Москва : Издательство МАИ, 2013. — 160 с.

8. Кобак, В. Г. Исследование алгоритма Крона и его модификации при различных исходных данных / В. Г. Кобак, Д. В. Титов, О. А. Золотых // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 8 (69). — С. 62–67.

9. Кобак, В. Г. Использование алгоритма Крона для формирования элит при решении однородной минимаксной задачи моделью Голдберга / В. Г. Кобак, О. А. Золотых, А. Ю. Гущин // Символ науки. — 2016. №4–3(16). — С. 79–83.

10. Кобак, В. Г. Перспективные алгоритмы решения неоднородной распределительной задачи теории расписаний / В. Г. Кобак, Д. Г. Красный, Р. А. Нейдорф // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. — 2008. — № 9 (86). — С. 152–156.

References

1. Cormen, T., et al. Algoritmy: postroenie i analiz. [Algorithms: construction and analysis.] Moscow: Vil'yams, 2013, 1328 p. (in Russian).

2. Gladkov, L.A., Kureychik, V.V., Kureychik, V.M. Geneticheskie algoritmy. [Genetic algorithms.] Moscow: Fizmatlit, 2006, 320 p. (in Russian).

3. Emelyanov, V.V., Kureychik, V.V., Kureychik, V.M. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya. [Theory and practice of evolutionary modeling.]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p. (in Russian).

4. Chernishev, Y.O., Poluyan, A.Y. Adaptivnyy geneticheskiy algoritm dlya resheniya zadach optimizatsii na osnove strategii elitizma. [Adaptive genetic algorithm for the decision of problems of optimization on the basis of strategy of elite.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2008, no. 4 (81), pp. 36–39 (in Russian).

5. Whitley, D. A genetic algorithm tutorial. Computer science department, Colorado State University. Available at: https://www.cs.colostate.edu/pubserv/pubs/Whitley-genitor-MiscPubs-tutorial.pdf (accessed: 20.10.2017).

6. Panteleev, A.V., Metlitskaya, D.V., Aleshina, E.A. Metody global'noy optimizatsii. Metaevristicheskie strategii i algoritmy. [Methods of global optimization. Meta-heuristic strategies and algorithms.] Moscow: Vuzovskaya kniga, 2013, 244 p. (in Russian).

7. Panteleev, A.V. Primenenie evolyutsionnykh metodov global'noy optimizatsii v zadachakh optimal'nogo upravleniya determinirovannymi sistemami. [Application of evolutionary methods of global optimization in problems of optimal control of determined systems]. Moscow: MAI Publ. House, 2013, 160 p. (in Russian).

8. Kobak, V.G., Titov, D.V., Zolotykh, O.A. Issledovanie algoritma Krona i ego modifikatsii pri razlichnykh iskhodnykh dannykh. [Investigation of Krohn's algorithm and its modification for various basic data.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 8 (69), pp. 62–67 (in Russian).

9. Kobak, V.G., Zolotykh, O.A., Gushchin, A.Y. Ispol'zovanie algoritma Krona dlya formirovaniya elit pri reshenii odnorodnoy minimaksnoy zadachi model'yu Goldberga. [Application of the Krohn's algorithm for elite formation in solving homogeneous minimax problem by Goldberg model.] Symbol of Science, 2016, no. 4–3(16), pp. 79–83 (in Russian).

10. Kobak, V.G., Krasniy, D.G., Neydorf, R.A. Perspektivnye algoritmy resheniya neodnorodnoy raspredelitel'noy zadachi teorii raspisaniy. [Perspective algorithms of the decision of a non-uniform distributive problem of the theory of schedules.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2008, no. 9 (86), pp. 152–156 (in Russian).

Поступила в редакцию 14.12.2017
Сдана в редакцию 15.12.2017
Запланирована в номер 15.03.2018

Received 14.12.2017
Submitted 12.12.2017
Scheduled in the issue 15.03.2018

Об авторах:

Кривошей Наталия Сергеевна,
аспирантка кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8805-3582
krins.work@gmail.com

Кобак Валерий Григорьевич,
профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1001-0574
valera33305@mail.ru

Authors:

Krivoshey, Natalia S.,
postgraduate student of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8805-3582
krins.work@gmail.com

Kobak, Valery G.,
professor of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1001-0574
valera33305@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 517.9 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-230-237

Математическое моделирование процессов теплообмена для воздушных надувных коллекторов цилиндрической формы*

О. А. Смирнова[1], Ю. Э. Аветисян[2]**
[1,2] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал), Донской государственный технический университет», г. Шахты, Ростовская область, Российская Федерация

Mathematical modeling of heat exchange processes for air-inflatable cylindrical collectors***

O. A. Smirnova[1], Y. E. Avetisyan[2]**
[1,2] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Russian Federation

Введение. Рассматривается новый вид устройств для сбора и аккумулирования энергии — воздушный надувной коллектор. Как правило, надувные коллекторы устанавливаются стационарно, что не подразумевает ориентацию коллектора вслед за движением Солнца. Ввиду низкой себестоимости рассматриваемых изделий, необходимо предложить и исследовать максимально эффективную конструкцию.

Материалы и методы. Рассматривается коллектор, состоящий из последовательно соединенных замкнутых цилиндрических сегментов. Полости цилиндров заполнятся воздухом, что обеспечивает постоянство конструкции. Математическое моделирование определения температурного поля воздушного надувного коллектора выполнено с помощью метода конечных элементов.

Результаты исследования. Распределение температурного поля, в зависимости от направления потока солнечной радиации, были подтверждены экспериментально. Математические модели признаны адекватными. Прирост температуры теплопоглощающего слоя по отношению к температуре окружающей среды составил от 7° до 26,2° в зависимости от части сегмента коллектора.

Обсуждение и заключения. В ходе имитационных и экспериментальных исследований было установлено, что на эффективность коллектора, кроме инсоляции Солнца, оказывают воздействие комплекс факторов окружающей среды: влажность воздуха, сила ветра и др. При этом необходимо учитывать конструктивное исполнение устройства, а также эксплуатационные и теплофизические характеристики применяемых материалов. Детальное исследование степени воздействия внешних и внутренних факторов на температурное поле коллектора требует последующей разработки программного комплекса.

Introduction. A new type of devices for collecting and accumulating energy – an air-inflatable collector – is considered. As a rule, inflatable collectors are installed permanently which does not imply the orientation of the collector following the solar motion. Due to the low costs of the products in question, it is necessary to offer and investigate the most efficient design.

Materials and Methods. A collector consisting of series-connected closed cylindrical segments is considered. Cavities of the cylinders are filled with air which maintains the structure constancy. Mathematical modeling of the definition of the air-inflatable collector temperature field is performed using the finite element method.

Research Results. The temperature field distribution as a function of the direction of solar radiation flow is substantiated experimentally. Mathematical models are considered adequate. The increase in temperature of the heat-absorbing layer with respect to the ambient temperature is from 7 ° to 26.2 ° depending on the part of the collector segment.

Discussion and Conclusions. In the course of simulation and experimental studies, it is established that the collector efficiency, apart from solar insolation, is affected by a range of environmental factors: air humidity, wind force, etc. In this case, it is necessary to take into account the device design, as well as the operational and thermophysical characteristics of the materials used. A detailed study of the severity of exposure of external and internal factors on the collector temperature field requires the subsequent development of the software package.

---

* Работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) договор №10577ГУ/2015 от 13.10.2016.
** E-mail: smir_nova@inbox.ru, 8754456@gmail.com
*** The research is supported by Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (FASIE) agreement No. 10577GU/2015 of 10.13.2016.

Ключевые слова: коллектор, тепловой поток, полимерные материалы, надувной, теплофизические свойства, математическая модель, метод конечных элементов, теплообмен.

Keywords: collector, heat flow, polymeric materials, inflatable, thermal properties, mathematical model, finite element method, heat exchange.

Образец для цитирования: Смирнова, О. А. Математическое моделирование процессов теплообмена для воздушных надувных коллекторов цилиндрической формы / О. А. Смирнова, Ю. Э. Аветисян // Вестник Дон. гос техн. ун-та. — 2018. — Т.2 № 2. — С.230–237.
DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-230-237

For citation: O. A. Smirnova, Y. E. Avetisyan. Mathematical modeling of heat exchange processes for air-inflatable cylindrical collectors. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 230–237. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-230-237

Введение. Популяризация применения альтернативных источников энергии требует детального изучения новых гелиотехнических решений. Тем более, если речь идет о малоизученном сегменте надувных воздушных коллекторов (далее коллектор). Сложность и многофакторность процессов теплообмена в рассматриваемых системах определяют трудоёмкость сбора и анализа экспериментальных данных [1–8]. На этапе разработки новых устройств, а также оптимизации действующей модели коллектора, важна аналитика по каждому фактору, влияющему на эффективность устройства в целом. Разработанная математическая модель позволит изучить температурное поле коллектора в зависимости от направления потока солнечной радиации.

Постановка задачи. В качестве объекта исследования был выбран коллектор, представляющий собой систему последовательно соединенных замкнутых цилиндров, наполненных воздухом. Каждый цилиндр системы состоит из двух слоев: верхнего — светопропускающего и нижнего — теплопоглощающего (абсорбера). Касательно к выступающим точкам теплопоглощающей части цилиндра прикреплена теплоизоляционная подложка. В образовавшемся зазоре локализуется теплоноситель — воздух. Предлагаемая конструкция коллектора (рис. 1) позволяет обеспечить стабильно высокую температуру теплоносителя вне зависимости от направления потока солнечной радиации на поверхность коллектора.

Результаты натурных и лабораторных экспериментов [9] определили основные требования, предъявляемые к материалам коллектора. Для изготовления светопропускающего слоя коллектора был выбран полиэтилентерефталат. Данный материал обладает высокими показателями теплостойкости, стойкости к УФ-старению, а также коэффициентом светопропускаемости равным 0,85. Теплопоглощающий слой выполнен из шерстяного полотна, оно вкладывается по контуру нижнего полуцилиндра.

Рассмотрим процесс теплообмена в одном звене солнечного коллектора (рис. 2) в зависимости от направления потока радиации на поверхность коллектора. Ввиду наличия прозрачного верхнего слоя предложено допущение, что верхний слой не оказывает значительного воздействия на распределение температурного поля цилиндрического сегмента.

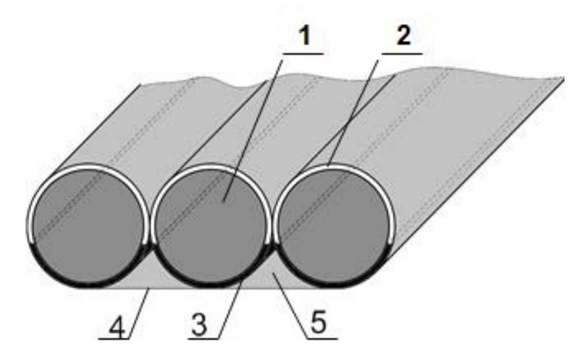


Рис. 1. Изображение воздушного надувного коллектора в разрезе:
1 — цилиндрический сегмент коллектора; 2 — светопропускающий прозрачный слой сегмента;
3 — теплопоглощающий слой сегмента;
4 — теплоизоляционный слой, 5 — область локализации теплоносителя

Fig. 1. Profile of air-inflatable collector:
1 - cylindrical collector segment; 2 - translucent transparent segment layer;
3 - heat-absorbing segment layer; 4 - heat-insulating layer,
5 - heat carrier localization area

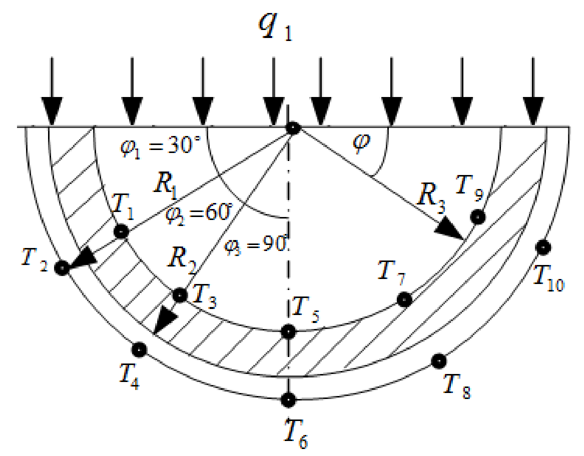


Рис. 2. Область расчета цилиндрического сегмента коллектора, в случае, если источник света расположен под прямым углом к диаметру сегмента коллектора

Fig. 2. Calculation domain of cylindrical collector segment in case when light source is normal to diameter of collector segment

Математическая модель задачи имеет вид:

область D_1 $$div\left(\lambda_1 gradT^{(1)}\right)=0\,; \tag{1}$$

область D_2 $$div\left(\lambda_2 gradT^{(2)}\right)=0\,. \tag{2}$$

Примем следующие граничные условия

$\rho = R_1$,

$$\lambda_2 \frac{\partial T^{(2)}}{\partial \rho} = -\alpha_1\left[T^{(2)}\left(R_1,\phi\right)-T_{окр}\right];$$

$$\rho = R_2\,,$$

$$T^{(1)}\left(R_2,\phi,t\right)=T^{(2)}\left(R_2,\phi,t\right);\ \lambda_1\frac{\partial T^{(1)}}{\partial\rho}=\lambda_2\frac{\partial T^{(2)}}{\partial\rho}\,;$$

$$\rho = R_3\,.$$

Для расчета температурного поля будем использовать метод конечных элементов (МКЭ). На рис. 3 представлена конечно-элементная сетка, покрывающая область расчета.

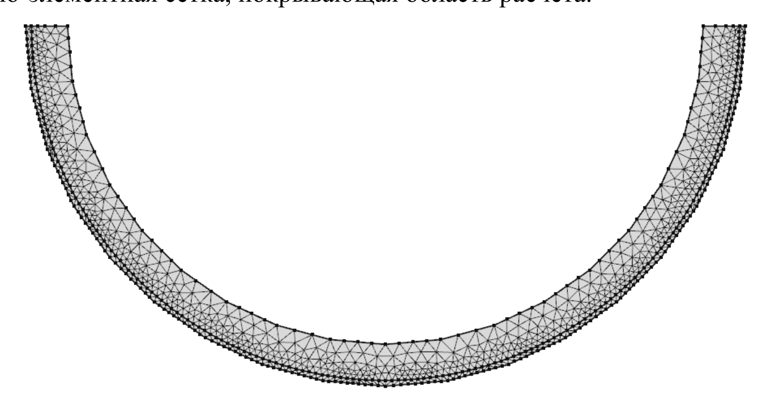


Рис. 3. Конечно-элементная сетка области расчета

Fig. 3. Finite-element grid of calculation domain

Решение данной задачи сводится к итерационному численному решению прямых задач и минимизации функционала

$$J=\sum_{j=1}^{N}\left(T_j - T_j^{изм}\right), \tag{3}$$

где N — число точек измерения температуры $T_j^{изм}$, T_j — значения температуры в тех же точках, полученных

путем решения прямых задач методом конечных элементов.

МКЭ в настоящее время стал одним из самых распространенных и эффективных методов решения задач математической физики и техники, сформулированных в виде краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными.

Пусть требуется найти распределение температуры $T(N)$ в некоторой области V, удовлетворяющей уравнению стационарной теплопроводности

$$div\left(\lambda^{(N)} gradT(N)\right) + f(N) = 0 \tag{4}$$

и условию на поверхности S, ограничивающей область V,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(M) = -\alpha(M)T(M), \tag{5}$$

где $\lambda(N)$ — коэффициент теплопроводности, в общем случае функция точки $N \in V$; $\alpha(M)$ — коэффициент теплоотдачи, $M \in S$; $f(N)$ — объемная плотность источников тепла.

Первый этап МКЭ — построение неортогональной сетки, покрывающей область расчета V. Сетка образует совокупность конечных элементов, например, тетраэдров, в плоскопараллельном поле треугольников. Далее следует нумерация элементов и узлов, составление массивов координат узлов.

На втором этапе выполняется аппроксимация искомых и известных функций (в нашем случае $T(N)$ и $f(N)$). На третьем этапе будет показано, что математическую модель исходной задачи можно преобразовать так, что аппроксимацию функций $T(N)$ и $f(N)$ допустимо искать в пространстве дифференцируемых функций C. Построим в этом пространстве подпространство с конечным базисом $\{\psi_j\}_{j=1}^{n}$. Базисные функции $\psi_j(N)$ выберем финитными (с конечным носителем) и кусочно-линейными.

В j-м узле сетки положим $\psi_j = 1$, в остальных узлах $\psi_j = 0$.

Тогда аппроксимирующие функции на втором этапе МКЭ будут иметь вид

$$\tilde{T}(x,y,z) = \sum_{j=1}^{n} T_j \psi_j(x,y,z); \; \tilde{f}(x,y,z) = \sum_{j=1}^{n} f_j \psi_j(x,y,z),$$

где n — количество узлов сетки; $T_j = T(x_j, y_j, z_j)$; $f_j = f(x_j, y_j, z_j)$.

В пределах k-го конечного элемента искомая функция представляется в виде

$$\tilde{T}^k(x,y,z) = \sum_{j=m+1}^{m+4} T_j \psi_j^k(x,y,z), \tag{6}$$

где $\psi_j^k = a_j^k x + b_j^k y + c_j^k z + d_j^k$.

В случае плоскопараллельного поля имеем

$$\tilde{T}^k(x,y) = \sum_{j=m+1}^{m+3} T_j \psi_j^k(x,y),$$

где $\psi_j^k = a_j^k x + b_j^k y + c_j^k$.

Постоянные коэффициенты ψ_j^k определяются через координаты узлов элемента.

На третьем этапе интегралы по области V заменяются суммой интегралов по конечным элементам V^k, интегралы по S — суммой интегралов по граням элементов, аппроксимирующих S.

Строится система уравнений МКЭ и учитываются граничные условия. Эту систему называют дискретной математической моделью задачи (ДММ).

Рассмотрим построение ДММ для проекционного варианта МКЭ, суть которого заключается в минимизации нормы невязки

$$\varepsilon = div\lambda grad\tilde{T}(N) + f$$

путем ортогонального проектирования ее на конечномерное подпространство с базисом $\{\psi_j\}_{j=1}^{n}$. Минимум невязки обеспечен в том случае, если все скалярные произведения невязки ε и ψ_j будут равны нулю.

В МКЭ принято использовать скалярные произведения более широкого класса функций (L_2).

В результате получим систему МКЭ в виде

$$\iiint_V \psi_i \left[div\left(\lambda grad\tilde{T}\right) + f \right] dV = 0\ ,\ i = 1, 2, ..., n\ .$$

Используя известные тождества

$$div\left(\phi\vec{a}\right) = \phi div\vec{a} + \vec{a} grad\phi\ ;$$

$$\iiint_V div\left(\phi\vec{a}\right) dV = \iint_S \phi a_n dS\ ,$$

где φ — скалярная функция; $\vec{a}$ — векторная функция; a_n — проекция $\vec{a}$ на внешнюю по отношению к V нормаль, получим систему уравнений вида

$$\iiint_V \lambda grad\tilde{T} grad\psi_i dV = \iint_S \lambda\psi_i \frac{\partial T}{\partial n} dS + \iiint_V \psi_i f dV\ ,\ i = 1, 2, ..., n\ , \quad (7)$$

где n — число узлов сетки, в которых неизвестны T_j.

Дальнейшие преобразования (7) приводят к системе уравнений вида

$$\sum_k \lambda^k \sum_j \beta_{ij}^k T_j = \sum_k \lambda^k q^k \iint_{S^k} \psi_i^k dS + \sum_k \sum_j f_j \iiint_{V^k} \psi_i^k \psi_j^k dV\ ,\ i = 1, 2, ..., n, \quad (8)$$

где $q^k = \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{S^k}$ — нормальная производная $T\left(M\right)$ на грани $S^k \in S$ k-го конечного элемента (принимается постоянной); V^k — область k-го элемента; $\beta_{ij}^k = \iint_{V^k} grad\psi_i^k grad\psi_j^k dV$.

Внешнее суммирование в (8) (по k) ведется по всем элементам, имеющим общий узел i, внутреннее (по j) — по всем узлам k-го элемента. Для всех внутренних узлов первый интеграл в правой части (8) равен нулю.

Систему (8) называют дискретной математической моделью задачи, если в нее подставить граничные условия. Решение системы (8) и использование (6) позволяют определить все интересующие величины (градиенты, потоки и т.п.).

Исходные данные: температура окружающего воздуха $T_{окр} = 23$ °С; тепловой поток $q = q_1 \sin\phi$, $q_1 = 310$ Вт/м^2 (значение теплового потока от источника излучения). Теплопроводность: светопропускающего слоя $\lambda_1 = 0,03$ Вт/м·К; теплопоглощающего слоя $\lambda_2 = 0,34$ Вт/м·К; коэффициент теплоотдачи $\alpha_T = 9,5$ Вт/м^2·К; $R_1 = 0,05$ м; $R_2 = 0,0492$ м; $R_3 = 0,0442$ м; $\phi_1 = 30^\circ$; $\phi_2 = 60^\circ$; $\phi_3 = 90^\circ$.

Необходимо определить распределение температур в установившемся режиме в точках: $T_1\left(R_3, \phi_1\right)$; $T_2\left(R_1, \phi_1\right)$; $T_3\left(R_3, \phi_2\right)$; $T_4\left(R_1, \phi_2\right)$; $T_5\left(R_3, \phi_3\right)$; $T_6\left(R_1, \phi_3\right)$.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице1.

Таблица 1
Table 1

	$T_1\left(R_3, \phi_1\right)$	$T_2\left(R_1, \phi_1\right)$	$T_3\left(R_3, \phi_2\right)$	$T_4\left(R_1, \phi_2\right)$	$T_5\left(R_3, \phi_3\right)$	$T_6\left(R_1, \phi_3\right)$
Вычисленные значения, °С	48,7	41,3	56,7	46,8	60,1	49,2

Далее приведены результаты математического моделирования теплообмена в одном сегменте коллектора для случая, когда источник света расположен под углом 45° к диаметру образца (рис. 4).

Исходные данные соответствуют тем, которые использовались при моделировании первого случая. Найдем распределение температур в установившемся режиме в точках: $T_1\left(R_3, \phi_1\right)$; $T_2\left(R_1, \phi_1\right)$; $T_3\left(R_3, \phi_2\right)$; $T_4\left(R_1, \phi_2\right)$; $T_5\left(R_3, \phi_3\right)$; $T_6\left(R_1, \phi_3\right)$; $T_7\left(R_3, \phi_4\right)$; $T_8\left(R_1, \phi_4\right)$; $T_9\left(R_3, \phi_5\right)$; $T_{10}\left(R_1, \phi_5\right)$.

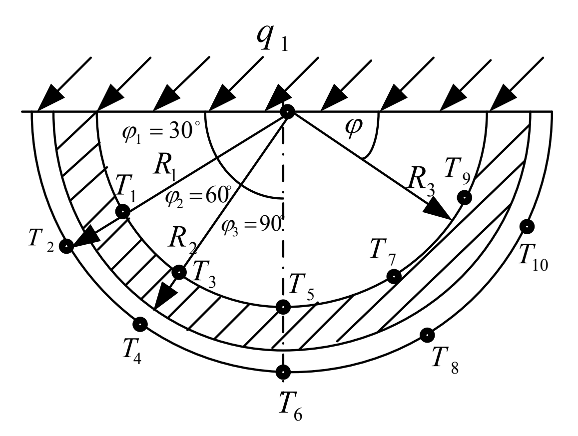


Рис. 4. Область расчета для случая, когда поток солнечного излучения расположен под углом к диаметру сегмента коллектора

Fig. 4. Calculation domain for case when solar radiation flux is set at 45° angle to collector segment diameter

Значения плотности теплового потока, приведенные в таблице 2, найдены на основе решения обратной задачи теплообмена.

Таблица 2

Table 2

γ, °	0–10	10–20	20–30	30–60	60–70	70–80	80–90	90–100	100–110	110–120	120–130	130–180
q, Вт/м^2	182	194	202	210	202	194	182	126	122	117	111	105

Адекватность математической модели была проверена экспериментально. С этой целью был изготовлен замкнутый цилиндрический сегмент коллектора. В качестве абсорбера использовалось шерстяное полотно. В ходе эксперимента образец воздушного коллектора был установлен вертикально. Напротив образца на расстоянии 0,8 м располагался источник света — прожектор с галогеновой лампой мощностью 1кВт. Излучение на поверхность теплопоглощающего слоя было направлено под углом 45°. С помощью датчиков температуры ИВТ (прибора для измерения плотности теплового потока) были зафиксированы значения температуры наружной поверхности светопропускающего и теплопоглощающего слоев в период термостабилизации, т.е. по истечении 20 мин. воздействия на коллектор источника света.

Результаты измерительного и вычислительного экспериментов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

	$T_1(R_3,\phi_1)$	$T_2(R_1,\phi_1)$	$T_3(R_3,\phi_2)$	$T_4(R_1,\phi_2)$	$T_5(R_3,\phi_3)$
Измеренные значения, °C	47,0	39,0	48,0	36,0	35,6
Вычисленные значения, °C	46,1	38,2	44,0	36,7	38,8
Погрешность, %	1,9	2,1	8,3	–1,9	–8,2
	$T_6(R_1,\phi_3)$	$T_7(R_3,\phi_4)$	$T_8(R_1,\phi_4)$	$T_9(R_3,\phi_5)$	$T_{10}(R_1,\phi_5)$
Измеренные значения, °C	30,6	33,0	30,0	33,4	32,3
Вычисленные значения, °C	33,1	34,5	30,0	34,4	30,0
Погрешность, %	–8,2	–4,5	0,0	–3,0	7,1

Среднеквадратическая погрешность $\Delta(T) = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{10}\left(T_i - T_i^*\right)^2}{10}} = 2,08$ °C.

Следовательно, результаты моделирования процессов теплообмена в сегменте коллектора для разных направлений воздействия потока солнечного излучения согласуются с результатами измерений с достаточной для инженерных задач точностью.

Выводы. Прирост температуры теплопоглощающего слоя по отношению к температуре окружающей среды составил от 7° до 26,2° в зависимости от рассматриваемой части сегмента коллектора и направления воздействия потока солнечной радиации. Таким образом, локализуясь между теплопоглощающим слоем и теплоизоляционной подложкой, конструкция коллектора обеспечит нагрев теплоносителя. Максимальные значения температурного поля поверхности теплопоглощающего слоя (60°) коллектора отмечаются при прямом воздействии солнечного излучения. Изменение угла воздействия потока излучения до 45° приводит к снижению температуры. В зависимости от сектора воздействия, температура поверхности теплопоглощающего слоя может снижаться на 3–14° по отношению к замерам при прямом воздействии солнечных лучей.

Адекватность разработанной математической модели позволит разработать программный продукт, который автоматизирует процесс расчета температурного поля коллектора.

Библиографический список

1. ГОСТ 28205–89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Руководство по испытанию на воздействие солнечной радиации / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Издательство стандартов, 1989г. — 17с.

2. ГОСТ Р 51910–2002. Методика исследования и проверки ускоренными методами влияния внешних воздействующих факторов на долговечность и сохраняемость технических изделий / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2002г. — 20с.

3. ГОСТ Р 26883–86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения / Государственный комитет СССР по стандартам — Москва : Издательство стандартов, 1986г. — 9с.

4. ГОСТ 28202–89 (СТ МЭК 68–2–5–75). Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Имитированная солнечная радиация на уровне земной поверхности: / Государственный комитет СССР по стандартам — Москва : Издательство стандартов, 1989. — 5.

5. ГОСТ Р 55617.1–2013. Возобновляемая энергетика. Установки солнечные термические и их компоненты. Солнечные коллекторы. Часть 1. Общие требования / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2013г. — 5с.

6. ГОСТ Р 51595–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2001г. — 27с.

7. ГОСТ Р 55617.2–2013. Возобновляемая энергетика. Установки солнечные термические и их компоненты. Солнечные коллекторы. Часть 2. Методы испытаний / Государственный комитет стандартов Российской Федерации, 2014г. — 94с.

8. Смирнова, О. А. Концепция комплексной оценки эксплуатационных показателей надувного коллектора / О. А. Смирнова, М. А. Гончарова, Ю. Э. Аветисян // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития. — 2017. — №2. — С.63–67.

9. Смирнова, О. А. Конфекционирование полимерных материалов для надувных воздушных солнечных коллекторов / О. А. Смирнова И. В. Ващинская, М. А. Гончарова, Ю. Э. Аветисян // Инновации в науке. — 2016. — №4 — С.52–57.

10. Бахвалов, Ю. А. Обратные задачи электротехники: монография / Ю. А. Бахвалов, Н. И. Горбатенко, В. В. Гречихин — Новочеркасск: Изд-во журнала «Изв. ВУЗов. Электромеханика», 2014. — 211 с.

11. Никифоров, А. Н. Методы оптимизации: учеб. пособие / А. Н. Никифоров — Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2007. — 160 с.

References

1. GOST 28205–89. Osnovnye metody ispytaniy na vozdeystvie vneshnikh faktorov. Chast' 2. Ispytaniya. Rukovodstvo po ispytaniyu na vozdeystvie solnechnoy radiatsii. [State standard 28205–89. Basic environmental testing procedures. Part 2. Guidance for solar radiation testing.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, 17p. (in Russian).

2. GOST R 51910–2002. Metodika issledovaniya i proverki uskorennymi metodami vliyaniya vneshnikh vozdeystvuyushchikh faktorov na dolgovechnost' i sokhranyaemost' tekhnicheskikh izdeliy. [GOST R 51910–2002. Research and testing strategy by accelerated methods of environmental conditions influence for industrial products longevity and storage ability. Development and design.] RF State Standards Committee, 2002, 20 p. (in Russian).

3. GOST R 26883–86. Vneshnie vozdeystvuyushchie faktory. Terminy i opredeleniya. [GOST R 26883–86. Exposure factors. Terms and definitions.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986, 9 p. (in Russian).

4. GOST 28202–89 (ST MEK 68–2–5–75). Osnovnye metody ispytaniy na vozdeystvie vneshnikh faktorov. Chast' 2. Ispytaniya. Imitirovannaya solnechnaya radiatsiya na urovne zemnoy poverkhnos. [GOST 28202–89 (ST IEC 68–2–5–75). Basic environmental testing. Part 2. Tests. Test Sa: Simulated solar radiation at ground level.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, 5 p. (in Russian).

5. GOST R 55617.1–2013. Vozobnovlyaemaya energetika. Ustanovki solnechnye termicheskie i ikh komponenty. Solnechnye kollektory. Chast' 1. Obshchie trebovaniya. [GOST R 55617.1–2013. Renewable power engineering. Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 1. General requirements.] RF State Standards Committee, 2013, 5 p. (in Russian).

6. GOST R 51595–2000. Netraditsionnaya energetika. Solnechnaya energetika. Kollektory solnechnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [GOST R 51595–2000. Nontraditional power engeneering. Solar power engeneering. Solar collectors. General specifications.] RF State Standards Committee, 2001, 27 p. (in Russian).

7. GOST R 55617.2–2013. Vozobnovlyaemaya energetika. Ustanovki solnechnye termicheskie i ikh komponenty. Solnechnye kollektory. Chast' 2. Metody ispytaniy. [GOST R 55617.2–2013. Renewable power engineering. Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 2. Test methods.] RF State Standards Committee, 2014, 94 p. (in Russian).

8. Smirnova, O.A., Goncharova, M.A., Avetisyan, Y.E. Kontseptsiya kompleksnoy otsenki ekspluatatsionnykh pokazateley naduvnogo kollektora. [Concept of full assessment of service factors of air-inflatable collector.] Innovatsionnye issledovaniya: problemy vnedreniya rezul'tatov i napravleniya razvitiya. [Innovative research: problems of results implementation and development trends.] 2017, no. 2, pp. 63–67 (in Russian).

9. Smirnova, O.A., Vashchinskaya, I.V., Goncharova, M.A., Avetisyan, Y.E. Konfektsionirovanie polimernykh materialov dlya naduvnykh vozdushnykh solnechnykh kollektorov. [Corfection of polymeric materials for air-inflatable solar collectors.] Innovatsii v nauke, 2016, no. 4, pp. 52–57 (in Russian).

10. Bakhvalov, Y.A., Gorbatenko, N.I., Grtchikhin, V.V. Obratnye zadachi elektrotekhniki: monografiya. [Inverse problems of electrical engineering: monograph.] Novocherkassk: Publ. House “University Proceedings”, 2014, 211 p. (in Russian).

11. Nikiforov, A.N. Metody optimizatsii: ucheb. posobie. [Optimization methods.] Novocherkassk: SPSPU {NPI), 2007, 160 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 06.12.2017
Сдана в редакцию 06.12.2017
Запланирована в номер 17.03.2018

Received 06.12.2017
Submitted 06.12.2017
Scheduled in the issue 17.03.2018

Об авторах:

Смирнова Ольга Александровна,
начальник отдела подготовки кадров высшей квалификации и организации научных исследований Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета в г. Шахты (РФ,346500, г. Шахты, ул. Шевченко,147), кандидат технических наук, доцент
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1992-6386
smir_nova@inbox.ru

Аветисян Юрий Эрнестович,
студент кафедры «Строительство и техносферная безопасность» Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета ДГТУ в г. Шахты (РФ,346500, г. Шахты, ул. Шевченко,147),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3278-2230
8754456@gmail.com

Authors:

Smirnova, Olga A.,
head of the Department for Training Highly Qualified Staff and Organization of Scientific Research, Institute of Service and Business (DSTU branch) (Russia, 346500, Shakhty, ul. Shevchenko, 147), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1992-6386
smir_nova@inbox.ru

Avetisyan, Yury E.,
student Institute of Service and Business (DSTU branch) (Russia, 346500, Shakhty, ul. Shevchenko, 147),
ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3278-2230
8754456@gmail.com

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.688 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-238-245

Алгоритм начальной инициализации кватерниона пространственной ориентации в параметрах Родрига-Гамильтона*

М. А. Исаев[1], А. М. Исаев[2], Н. В. Кудинов[3], Р. С. Мироненко[4]**
[1,3,4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Северокавказский государственный технический университет, г. Ставрополь, Российская Федерация
[2]ООО «Стилсофт», г. Ставрополь, Российская Федерация

Initialization algorithm for spatial orientation quaternion in Rodrigues-Hamilton parameters ***

M.A. Isaev[1], A.M. Isaev[2], N.V. Kudinov[3], R.S. Mironenko[4]**
[1,3,4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]North Caucasian State Technical University, Stavropol, Russian Federation
[2]"Stilsoft" LLC, Stavropol, Russian Federation

Введение. Настоящая работа посвящена уменьшению времени коррекции оценки пространственной ориентации твердого тела в момент включения системы ориентации. Для определения пространственной ориентации твердого тела используются интегрированные показания от трех ортогонально расположенных датчиков угловой скорости. Возникающая при интегрировании разница между реальной пространственной ориентацией и ориентацией, оцененной с помощью датчиков, корректируется за счет информации, получаемой от других датчиков, таких как акселерометры и магнитометры. В большинстве существующих методов информация, полученная от акселерометров и магнитометров и преобразованная с помощью алгоритма, умножается на коэффициент коррекции и вычитается из оценки угловой скорости, тем самым корректируя оценку пространственной ориентации. Чем больше угол наклона твердого тела относительно горизонта в момент включения системы ориентации, тем больше ошибка оценки пространственной ориентации. Предлагаемый в данной работе алгоритм корректирует оценку пространственной ориентации в компонентах кватерниона без использования датчиков угловой скорости, что позволяет за меньшее, по сравнению с существующими алгоритмами, время свести к минимуму ошибку оценки ориентации.

Материалы и методы. Для отработки алгоритма коррекции был использован датчик *MPU*6050, выполненный по микроэлектромеханической технологии и имеющий в одном корпусе три ортогонально расположенных измерителя угловой скорости и три ортогонально расположенных акселерометра. Информацию, поступающую с *MPU*6050, обрабатывает микроконтроллер *dsPIC*33*EP*256*MU*806. Пространственная ориентация вычисляется через

Introduction. The correction time reduction for the spatial orientation evaluation of a solid under the orientation system initiation is considered. Solid spatial orientation is measured by the integrated values from three orthogonal angular speed sensors. Difference between the actual spatial orientation and the orientation estimated by sensors is adjusted due to the data obtained from other sensors, such as accelerometers and magnetometers. Major existing algorithms deduct data acquired from accelerometers and magnetometers from the evaluation of angular rate through the correction factor thus correcting the spatial orientation assessment error. The higher the solid inclination angle in relation to horizon when the orientation system is switched on, the greater the spatial orientation error is. The algorithm presented herein corrects the spatial orientation evaluation in quaternion components without angular rate sensors which allows minimizing the spatial orientation assessment error within shorter time in comparison with the existing algorithms.

Materials and Methods. To implement the correction algorithm, the *MPU6050* sensor is used. It is made with microelectromechanical technology, and its body includes three orthogonally located angular velocity sensors and three orthogonally located accelerometers. The output data from *MPU6050* sensor is processed by *dsPIC33EP256MU806* microchip. The spatial orientation is calculated by the Rodrigues-Hamilton parameters in the quaternion components.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: isaev@stilsoft.ru; mrraptor26@gmail.com; kudinov_nikita@mail.ru; rmironenko@donstu.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

параметры Родрига-Гамильтона в компонентах кватерниона, результат вычислений передается в программный пакет *Matlab*, выполняющий программу для визуализации зависимостей от времени четырёх компонент кватерниона в виде графиков.
Результаты исследования. В существующих алгоритмах, использующих параметры Родрига-Гамильтона, при начальной инициализации системы ориентации авторами предложено увеличивать значение коэффициента коррекции на время инициализации, либо с помощью тригонометрических формул находить углы Эйлера и переводить их в параметры Родрига-Гамильтона. В первом случае время начальной инициализации остается достаточно большим, во втором случае, из-за использования углов Эйлера, может возникать такое явление как «шарнирный замок». Предложенный в данной работе алгоритм осуществляет начальную инициализацию за время, сравнимое со временем инициализации в углах Эйлера, но при этом использует только параметры Родрига-Гамильтона.
Обсуждение и заключения. Использование предложенного алгоритма позволит минимум в 5 раз сократить время начальной инициализации кватерниона пространственной ориентации и, как следствие, общее время, необходимое для приведения системы в рабочее состояние, за счет того, что начальная инициализация необходима при каждом включении системы ориентации. В силу того, что инициализация происходит только по показаниям акселерометра, то для корректного определения пространственной ориентации по предложенному алгоритму необходимым условием является отсутствие любых ускорений на тело кроме ускорения свободного падения.

Ключевые слова: кватернион, параметры Родрига-Гамильтона, приборный базис, коррекция, гироскопы, акселерометры, плоскость приведения.

***Образец для цитирования*:** Алгоритм начальной инициализации кватерниона пространственной ориентации в параметрах Родрига-Гамильтона / М. А. Исаев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 2. — С. 238–245. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-238-245

The result is input to the *Matlab* software package which executes the program of visualizing the dependencies on the time of four quaternion components graphically.
Research Results. In existing algorithms that use the Rodrigues-Hamilton parameters, at the initial initialization of the orientation system, it is suggested to increase the correction factor, or to use the trigonometric formulas to find the Euler angles and translate them into the Rodrigues-Hamilton parameters. In the first case, the initial initialization time remains sufficiently long, in the second case, due to the use of Euler angles, a phenomenon of "gimbal lock" can be observed. The proposed algorithm performs the initial initialization in a time equivalent to the initialization time in the Euler angles parameters, but it applies only the Rodrigues-Hamilton parameters.
Discussion and Conclusions. Using the proposed algorithm will allow a minimum of 5-fold reduction in the initial initialization time of the spatial orientation quaternion. In consequence, the total time required for activating the system will be also reduced due to the fact that the initial initialization is necessary every time the orientation system is switched on. For the correct determination of the spatial orientation according to the proposed algorithm, the necessary condition is the absence of any acceleration on the body other than the gravitational acceleration because the initialization occurs only upon the accelerometer readings.

Keywords: quaternion, Rodrigues-Hamilton parameters, instrument coordinate system, correction, gyroscopes, accelerometers, reference plane.

For citation: M.A. Isaev, A.M. Isaev, N.V. Kudinov, R.S. Mironenko. Initialization algorithm for spatial orientation quaternion in Rodrigues-Hamilton parameters. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 238–245. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-238-245

Введение. В задачах определения пространственной ориентации твердого тела относительно опорной системы координат широко применяются бесплатформенные инерциальные навигационные системы. В современных системах, к которым предъявляют жесткие требования по массогабаритным показателям, при определении пространственной ориентации в качестве сенсоров используются измеритель проекции угловой скорости на ось чувствительности (далее такие сенсоры будем называть гироскопами), измерители проекции ускорения на ось чувствительности (акселерометры) и измеритель проекции вектора магнитного поля (магнитный компас). В общем случае при определении пространственной ориентации в качестве основного источника информации используют интегрированные показания от трех датчиков угловой скорости, расположенных взаимно-перпендикулярно. С помощью информации, получаемой от акселерометра и магнитного компаса, оси чувствительности которых расположены так же, как и оси гироскопа, сводят к минимуму возникающую в процессе интегрирования угловой скорости ошибку, которая есть разница между реальной пространственной ориентацией и пространственной ориентацией, вычисленной с помощью датчиков угловой скорости[1]. Существует несколько кинематических параметров для описания движения твердого тела около неподвижной точки [2]:

- Углы Эйлера-Крылова;
- Матрица направляющих косинусов;
- параметры Родрига-Гамильтона (в компонентах кватерниона).
- параметры Кейли – Клейнав.

Применение кватернионов позволяет создать удобный и наглядный формализм, использующий параметры Родрига-Гамильтона для описания пространственной ориентации твердого тела, что является наиболее близким к оптимальному с точки зрения вычислительной техники [2, 3]. При описании пространственной ориентации удобно выделять три базиса:

- Опорный базис I, неподвижный в инерциальном пространстве, представленный в виде единичного кватерниона на рис. 1;
- Приборный базис I^* — оцененная с помощью датчиков пространственная ориентация объекта;
- Связанный базис E — базис, связанный с объектом ориентации.

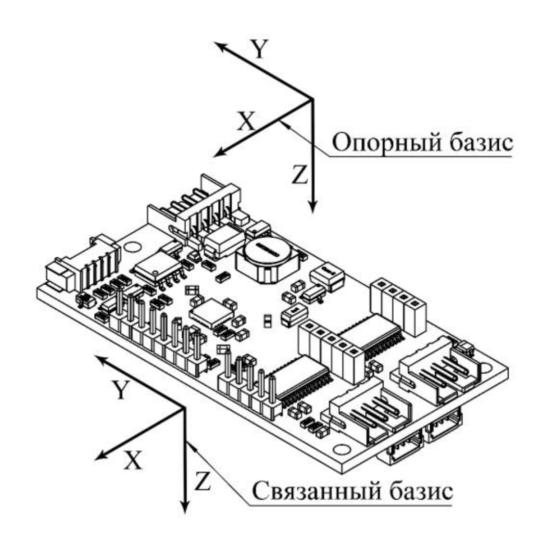


Рис. 1. Расположение систем координат в связанном и опорном базисах

Fig. 1. Location of coordinate systems in local and world frames

Кватернионом называется упорядоченная четверка действительных чисел:

$$\Lambda = (\lambda_0, \quad \lambda_1, \quad \lambda_2, \quad \lambda_3), \tag{1}$$

где λ_0 — скалярная часть; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — векторная часть.

Единичный кватернион представлен в виде:

$$\Lambda = (1, \quad 0, \quad 0, \quad 0). \tag{2}$$

Кватернион, описывающий пространственную ориентацию твердого тела, есть кватернион, описывающий поворот относительно единичного кватерниона. Из-за несовершенства датчиков угловой скорости, конечной разрядности чисел при представлении на ЭВМ с течением времени накапливается ошибка, которую можно выразить как разницу между опорным базисом и приборным. Для приведения приборного базиса к опорному ($I^* \rightarrow I$) коррекция должна осуществляться через изменение кватерниона поворота $\Delta\Lambda$, который находится путем интегрирования измеренной датчиком угловой скорости. При таком методе коррекции время приведения приборного базиса к опорному прямо пропорциональна ошибке между этими базисами. В момент включения системы ориентации необходимо за минимальный промежуток времени свести ошибку между опорным и приборным базисами к минимуму (произвести «выставку» системы ориентации). В работе [4] автор на время «выставки» предлагает увеличить коэффициент коррекции через который осуществляется приведение приборного базиса к опорному. Под коэффициентом коррекции понимается число, на которое умножаются компоненты коррекции перед изменением кватерниона поворота $\Delta\Lambda$. С учетом увеличения коэффициента коррекции «выставка» занимает время от 100 до 3000 итераций в зависимости от значения коэффициента коррекции и начальной пространственной ориентации системы (под итерацией понимается период интегрирования показаний гироскопа). Авторами предлагается алгоритм, позволяющий уменьшить ошибку оцененной пространственной ориентации до минимальной величины, которая определяется точностью акселерометров, за 10 итераций вне зависимости от начального положения системы.

Коррекция оценки ориентации приборного базиса. В монографии [3] авторы предлагают построение модели коррекции в векторной форме с помощью плоскости приведения, ориентиром для построения которой является вектор силы тяжести. Для построения полного приборного базиса нужны два неколлинеарных ориентира. В качестве второго ориентира может выступать вектор магнитного поля. В данной работе рассматривается исключительно коррекция на базе плоскости приведения.

Вектор при описании вращения кватернионами удобно выражать как кватернион, нулевая компонента которого (скалярная часть кватерниона) равна нулю

$$i_E{}^* = (0, \quad Accel_X, \quad Accel_Y, \quad Accel_Z), \tag{3}$$

где $i_E{}^*$ — вектор оценки линейных ускорений в связанном базисе, выраженный через кватернион; $Accel_X$ — проекция оценки линейного ускорения на ось X акселерометра в связанном базисе; $Accel_Y$ — проекция оценки линейного ускорения на ось Y акселерометра в связанном базисе; $Accel_Z$ — проекция оценки линейного ускорения на ось Z акселерометра в связанном базисе.

Необходимо выполнить проекцию вектора оценки линейных ускорений из связанного базиса в опорный [4]:

$$i_I{}^* = \Lambda \circ i_E{}^* \circ \widetilde{\Lambda}, \tag{4}$$

где $i_I{}^*$ — вектор показаний акселерометра в опорном базисе, выраженный через кватернион; Λ — кватернион текущей пространственной ориентации; $\widetilde{\Lambda}$ — сопряженный кватернион текущей пространственной ориентации.

Умножение кватернионов не коммутативно, обозначается символом «∘» и выражается системой уравнений (6–9) [5]:

$$N = \Lambda \circ M, \tag{5}$$

$$N_0 = \Lambda_0 M_0 - \Lambda_1 M_1 - \Lambda_2 M_2 - \Lambda_3 M_3, \tag{6}$$

$$N_1 = \Lambda_0 M_1 + \Lambda_1 M_0 + \Lambda_2 M_3 - \Lambda_3 M_2, \tag{7}$$

$$N_2 = \Lambda_0 M_2 + \Lambda_2 M_0 + \Lambda_3 M_1 - \Lambda_1 M_3, \tag{8}$$

$$N_3 = \Lambda_0 M_3 + \Lambda_3 M_0 + \Lambda_1 M_2 - \Lambda_2 M_1. \tag{9}$$

Кватернионом, сопряженным данному кватерниону Λ, является кватернион, обозначаемый $\widetilde{\Lambda}$ [6]:

$$\widetilde{\Lambda} = (\lambda_0, \quad -\lambda_1, \quad -\lambda_2, \quad -\lambda_3). \tag{10}$$

У сопряженного кватерниона векторная часть взята с обратным знаком (данный кватернион необходим для осуществления проекций из одного базиса в другой).

Вектор ориентира в опорном базисе выразим через кватернион:

$$i_I = (0, \quad 0, \quad 0, \quad 1), \tag{11}$$

где i_I — вектор ориентира в опорном базисе в выбранной системе координат, выраженный через кватернион (рис. 1).

В данном случае в качестве неподвижного ориентира выступает вектор силы тяжести в опорном базисе, так как выбор данного ориентира позволяет скомпенсировать ошибку ориентации по крену и тангажу. Компоненты вектора ориентира выбираются из следующих соображений:

- нулевой компонент равен нулю;
- 1-й компонент — показание акселерометра по оси X при совмещении осей датчика с опорным базисом;
- 2-й компонент — показание акселерометра по оси Y при совмещении осей датчика с опорным базисом;
- 3-й компонент — показание акселерометра по оси Z при совмещении осей датчика с опорным базисом.

Разница между вектором ориентира в опорном базисе и вектором оценки линейных ускорений в опорном базисе составит величину

$$\delta_I = i_I - i_I{}^*. \tag{12}$$

Компоненты коррекции оценки пространственной ориентации в опорном базисе находим через формулу:

$$\omega_I^* = \delta_I \circ i_I^*, \quad (13)$$

где ω_I^* — кватернион, содержащий компоненты коррекции кватерниона пространственной ориентации в опорном базисе.

Проекция компонент коррекции из опорного в связанный базис выражается через формулу

$$\omega_E^* = \widetilde{\Lambda} \circ \omega_I^* \circ \Lambda, \quad (14)$$

где ω_E^* — кватернион, содержащий компоненты коррекции кватерниона пространственной ориентации в связанном базисе.

С помощью ω_E^* корректируется оценка угловой скорости:

$$\Delta\Lambda = (1,\ \sin\frac{(\omega_X-(\alpha\cdot \omega_{E1}^*))\cdot\Delta t}{2},\ \sin\frac{(\omega_Y-(\alpha\cdot \omega_{E2}^*))\cdot\Delta t}{2},\ \sin\frac{(\omega_Z-(\alpha\cdot \omega_{E3}^*))\cdot\Delta t}{2}), \quad (15)$$

где ω_X — проекция угловой скорости на ось X гироскопа в связанном базисе; ω_Y — проекция угловой скорости на ось Y гироскопа в связанном базисе; ω_Z — проекция угловой скорости на ось Z гироскопа в связанном базисе; Δt — период интегрирования показаний гироскопа; α — коэффициент пропорциональной коррекции, $\alpha > 0$; $\Delta\Lambda$ — кватернион поворота.

Коэффициент α выбирается из следующих соображений. При большом значении коэффициента возникает колебательный процесс компонент кватерниона, при малом значении коррекция не будет компенсировать ошибку, вызванную разного рода погрешностями при измерении угловой скорости, поэтому данный коэффициент выбирается из компромисса скорости приведения приборного базиса к связанному и отсутствия колебательного процесса.

Авторы в [2] вводят понятие кватерниона малого поворота. Если период опроса датчика очень мал, система физически не успеет повернуться на большой угол за отведенное время. С учетом этого целесообразно отказаться от функции вычисления синуса угла (тем самым уменьшив процессорное время расчета), т. к. функция синуса вблизи нуля почти линейна. В этом случае осуществляется линейная аппроксимация кватерниона поворота:

$$\Delta\Lambda = (1,\ \frac{(\omega_X-(\alpha\cdot \omega_{E1}^*))\cdot\Delta t}{2},\ \frac{(\omega_Y-(\alpha\cdot \omega_{E2}^*))\cdot\Delta t}{2},\ \frac{(\omega_Z-(\alpha\cdot \omega_{E3}^*))\cdot\Delta t}{2}). \quad (16)$$

Затем выполняется операция умножения кватерниона текущей пространственной ориентации на кватернион малого поворота:

$$N_t = N_{t-1} \circ \Delta\Lambda, \quad (17)$$

где N_t — кватернион оценки пространственной ориентации; N_{t-1} — кватернион оценки пространственной ориентации в предыдущий момент времени.

С учетом медленного ухода нормы кватерниона от единицы при реализации вычислений на ЭВМ, необходимо периодически производить нормирование кватерниона пространственной ориентации по формулам (19, 20), т. е. приводить норму кватерниона к единице:

$$\parallel N \parallel = \nu_0^2 + \nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2 \approx 1, \quad (18)$$

где $\parallel N \parallel$ — норма кватерниона;

$$|N| = \sqrt{\nu_0^2 + \nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2}, \quad (19)$$

где $|N|$ — тензор кватерниона;

$$N_{Norm} = \frac{\nu_0}{|N|}, \frac{\nu_1}{|N|}, \frac{\nu_2}{|N|}, \frac{\nu_3}{|N|}, \quad (20)$$

где N_{Norm} — нормированный кватернион или верзор [1, 6].

Описанный выше алгоритм (3–20) осуществляет устойчивую коррекцию кватерниона пространственной ориентации через изменение оценки угловой скорости так же, как это происходит в алгоритмах Махони [8,10] и Маджвика [4]. Разница алгоритмов заключается в методике определения компонентов коррекции.

Алгоритм быстрой начальной инициализации кватерниона пространственной ориентации. Целью предлагаемого алгоритма является уменьшение времени приведения приборного базиса к связанному, причем коррекция осуществляется итерационно, посредством умножения кватерниона пространственной ориентации на кватернион коррекции.

Последовательность действий в алгоритме следующая:

1) Опрос трех осей акселерометра;
2) Определение компонент коррекции оценки ориентации по формулам (3–14);
3) Преобразование компонент коррекции в кватернион поворота:

$$\Delta\Lambda = \left(1,\ \sin\frac{\omega_{E1}^*}{2},\ \sin\frac{\omega_{E2}^*}{2},\ \sin\frac{\omega_{E3}^*}{2}\right), \tag{21}$$

где ω_1^* — первая компонента коррекции в связанном базисе; ω_2^* — вторая компонента коррекции в связанном базисе; ω_3^* — третья компонента коррекции в связанном базисе.

4) Кватернион текущей пространственной ориентации умножается на сопряженный кватернион поворота:

$$N_t = N_{t-1} \circ \Delta\tilde{\Lambda}. \tag{22}$$

5) Выполняется нормирование кватерниона пространственной ориентации (19, 20);
6) Возврат к шагу 1.

Эксперимент по определению времени переходных процессов компонент кватерниона при использовании разработанngого алгоритма. Цель эксперимента — сравнить время переходных процессов компонент кватерниона при использовании коррекции через изменение оценки угловой скорости и коррекции по предложенному алгоритму. Описанные в данной статье алгоритмы приведения приборного базиса к связанному были реализованы на микроконтроллере *dsPIC*33*EP*256*MU*806. В качестве датчика для определения пространственной ориентации использовался *MPU*6050 — 3-х осевой гироскоп, измеряющий проекции угловых скоростей на свои оси чувствительности, и 3-х осевой акселерометр. Микроконтроллером вычислялись компоненты трех кватернионов пространственной ориентации по показаниям датчика при однократном измерении. Компоненты первого кватерниона вычислялись через изменение оценки угловой скорости с коэффициентом $\alpha = 0{,}1$ (предварительный эксперимент со многими измерениями показал, что именно это значение является компромиссом между колебательным процессом и скоростью коррекции приборного базиса в течении всего времени работы данной системы ориентации). Компоненты второго кватерниона вычислялись через изменение оценки угловой скорости с увеличенным коэффициентом $\alpha = 5$. Компоненты третьего кватерниона вычислялись по предложенному алгоритму быстрой инициализации. В момент включения и на протяжении всего эксперимента, датчик находился повернутым относительно горизонта по тангажу на 18 градусов и по крену на 174 градуса.

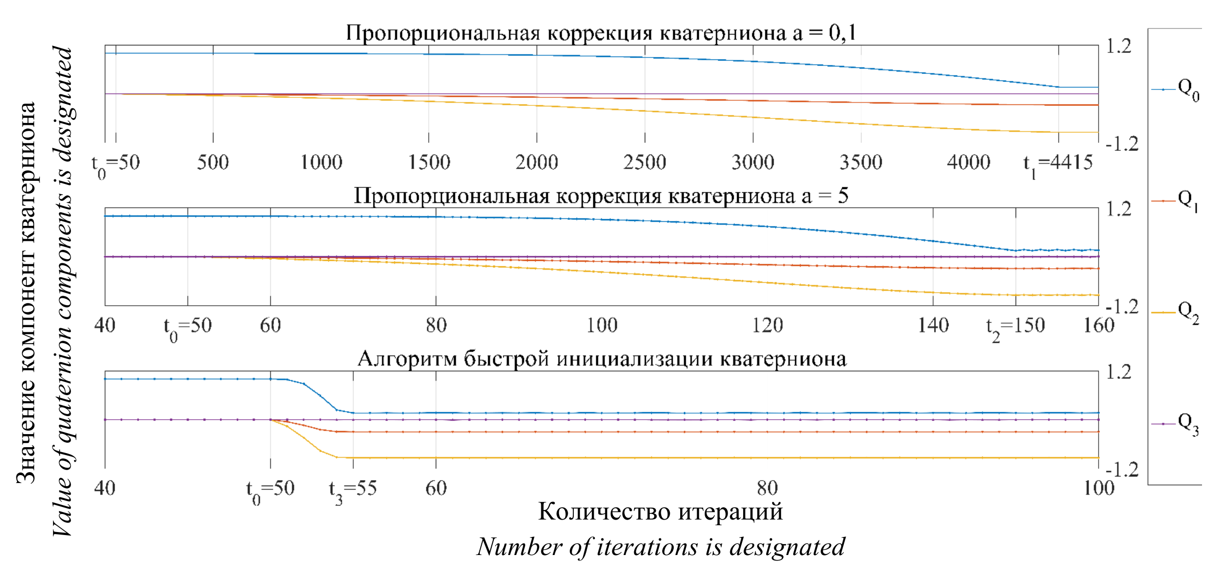


Рис. 2. Переходные процессы компонент кватерниона в параметрах Родрига-Гамильтона.

Fig. 2. Transition processes of quaternion components in Rodrigues-Hamilton parameters

До момента времени $t_0 = 50$ микроконтроллер отправляет 3 единичных кватерниона для обработки в программу, работающую в интерпретируемой среде *Matlab*. В момент времени t_0 включается коррекция. В первом случае приведение приборного базиса к связанному завершается в момент времени $t_1 = 4415$. Во втором случае — в момент $t_2 = 150$. В третьем случае — в момент $t_3 = 55$. Признаком окончания коррекции является завершение переходного процесса компонент кватерниона:

$$\Delta_{t_Quat_1} = t_1 - t_0 = 4365, \quad (23)$$

$$\Delta_{t_Quat_2} = t_2 - t_0 = 100, \quad (24)$$

$$\Delta_{t_Quat_3} = t_3 - t_0 = 5, \quad (25)$$

где Δ_{t_Quat} — количество итераций, за которое система ориентации скорректировала оценку пространственной ориентации в компонентах кватерниона в каждом из трех случаев.

Выводы. Предложенный алгоритм начальной выставки системы оказался быстрей в 873 раза по сравнению с коррекцией через оценку угловой скорости с коэффициентом коррекции $\alpha = 0{,}1$ и в 20 раз быстрей по сравнению с коррекцией через оценку угловой скорости с увеличенным коэффициентом коррекции $\alpha = 5$. В силу того, что кватернион поворота в данном алгоритме вычисляется только по показаниям акселерометров, то ошибка выставки системы будет прямо пропорциональна паразитному ускорению, действующему на систему. Под паразитным следует понимать любое ускорение, отличное от ускорения свободного падения. Поэтому после завершения начальной «выставки» необходимо отключать предложенный алгоритм и включать коррекцию через изменение оценки угловой скорости, как это предлагается в работах [4, 8].

Библиографический список

1. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / К. К. Веремеенко [и др.], — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009 г., 556 с.
2. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. — Москва : Наука, 1973. — 320 с.
3. Бранец, В. Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. — Москва : Наука, 1992. — 280 с.
4. Madgwick S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / S.O.N. Madgwick // Report x-io and University of Bristol 2010. — 32 p.
5. Hamilton, W.R. On quaternions, or on a new system of imaginaries in algebra / W.R. Hamilton // Philosophical Magazine 1844. — Vol. XXV, — P. 10–13.
6. Ватульян, А. О. Кватернионы / А. О. Ватульян // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 5. — С. 117–120.
7. Гордеев, В. Н. Кватернионы и трехмерная геометрия / В. Н. Гордеев. — Киев: Сталь, 2012. — 318 с.
8. Mahony, R. Complementary filter design on the special orthogonal group / Robert Mahony, Tarek Hamel, Jean-Michel Pflimlin // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville, Spain, December 12-15, 2005. P. 1477–1484.
9. Roberto G. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs / Roberto G. Valenti, Ivan Dryanovsky, Jizhong Xiao // Sensors – Open Access Journal, 2015 P. 29.
10. Grant, B. Complementary filter design on the Special Euclidean group SE / Grant Baldwin, Robert Mahony, Jochen Trumpf, Tarek Hamel, Thibault Cheviron // Control Conference (ECC), 2007 European, Kos, Greece, July 2-5, 2007. P. 8.

References

1. Veremeenko, K.K., et al. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov. [Modern information technologies in tasks of navigation and guiding maneuvering air drones.] Moscow: FIZMATLIT, 2009, 556 p. (in Russian).
2. Branets, V.N., Shmyglevsky, I.P. Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela. [Application of quaternions in solid orientation problems]. Moscow: Nauka, 1973. — 320 c. (in Russian).
3. Branets, V.N., Shmyglevsky, I.P. Vvedenie v teoriyu besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh system. [Introduction to the theory of strap down inertial navigation systems.] Moscow: Nauka, 1992, 280 p. (in Russian).
4. Madgwick, S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Report x-io and University of Bristol, 2010, 32 p.
5. Hamilton, W.R. On quaternions, or on a new system of imaginaries in algebra. Philosophical Magazine, 1844, vol. XXV, pp. 10–13.
6. Vatulyan, A.O. Kvaterniony. [Quaternions.] Soros Educational Journal, 1999, no. 5, pp. 117–120 (in Russian).

7. Gordeev, V.N. Kvaterniony i trekhmernaya geometriya. [Quaternions and three-dimensional geometry.] Kiev: Stal', 2012, 318 p. (in Russian).

8. Mahony, R., Hamel,T., Pflimlin, J.-M. Complementary filter design on the special orthogonal group. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, 2005, Seville, Spain, December 12-15, 2005, pp. 1477–1484.

9. Valenti, R.G., Dryanovsky, I., Jizhong Xiao. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs . Sensors – Open Access Journal, 2015, p. 29.

10. Grant, B., Mahony, R., Trumpf, J., Hamel, T., Cheviron, T. Complementary filter design on the Special Euclidean group SE. Control Conference (ECC), 2007 European, Kos, Greece, July 2-5, 2007, p. 8.

Поступила в редакцию 22.01.2018
Сдана в редакцию 26.01.2018
Запланирована в номер 17.03.2018

Received 22.01.2018
Submitted 26.01.2018
Scheduled in the issue 17.03.2018

Об авторах:

Исаев Михаил Александрович,
магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1972-6923
mrraptor26@gmail.com

Исаев Александр Михайлович,
аспирант Северокавказского государственного технического университета (РФ, 355035 г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 16/1),
руководитель отдела разработки беспилотных летательных аппаратов ООО «Стилсофт» (РФ, 355042, г. Ставрополь, ул. Васильковая, 29),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3307-5397
isaev@stilsoft.ru

Кудинов Никита Валерьевич,
доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-003-4723-0906
kudinov_nikita@mail.ru

Мироненко Роман Сергеевич,
доцент кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1873-7222
rmironenko@donstu.ru

Authors:

Isaev, Mikhail A.,
graduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1972-6923
mrraptor26@gmail.com

Isaev, Alexander M.,
postgraduate student, North Caucasian State Technical University (RF, 355035, Stavropol, pr-t. Kulakova, 16/1),
air drone product development manager, “Stilsoft” LLC (RF, 355042, Stavropol, ul. Vasilkovaya, 29),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3307-5397
isaev@stilsoft.ru

Kudinov, Nikita V.,
associate professor of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-003-4723-0906
kudinov_nikita@mail.ru

Mironenko, Roman S.,
associate professor of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1873-7222
rmironenko@donstu.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 512.6
DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-246-255

Геометрическая реализация метода проведения электронных выборов, основанного на пороговом разделении секрета*

А. В. Мазуренко[1], В. А. Стукопин[2]**
[1]ООО «ДДОС-Гвард», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Geometric realization of electronic elections based on threshold secret sharing***

A. V. Mazurenko, V. A. Stukopin**
[1]DDoS-GUARD LLC, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Среди актуальных задач криптографии можно выделить задачу обеспечения безопасного и честного проведения электронного голосования. В настоящей работе описан метод проведения электронных выборов с точки зрения обеспечения криптографической безопасности.
Материалы и методы. При решении поставленной исследовательской задачи использованы теоретические результаты из теории конечных полей, проективной геометрии и линейной алгебры. Разработанная криптосистема основана на применении геометрических объектов, рассматриваемых в проективной геометрии над конечными полями.
Результаты исследования. Разработанный алгоритм основан на схеме шифрования Эль-Гамаля и на новом геометрическом способе разделения секрета между избирательными комиссиями. Данный способ использует особенности построения аффинных пространств над конечными полями для создания подходящих геометрических конструкций и генерации секрета, поиск которого, с точки зрения злоумышленника, является сложной алгоритмической задачей. Использование порогового метода разделения секрета обосновывается необходимостью исключить возможность фальсификации результатов голосования со стороны членов избирательной комиссии. Авторами определено, с какой вероятностью злоумышленнику удастся сгенерировать верную секретную долю в случае, когда ему известна лишь ее некоторая часть.
Обсуждение и заключения. Предложенная криптографическая система может быть применена для проведения электронных выборов, а также в тех областях, где возникает необходимость в использовании методов пороговой криптографии.

Introduction. One of the tasks arising in cryptography is to ensure a safe and fair conduct of e-voting. This paper details the algorithm of electronic elections particularly that part which deals with the cryptographic security.
Materials and Methods. The results are obtained on the basis of the following methodology: finite field theory, projective geometry, and linear algebra. The developed cryptosystem is based on the application of geometric objects from projective geometry over finite fields.
Research Results. The invented algorithm relies on the ElGamal encryption and a new geometric way of secret sharing among election committees. The proposed method uses some features of affine spaces over finite fields to generate special geometric constructions and secret, search of which is a complex algorithmic task for an illegal intruder. The threshold secret sharing is used to prevent voter fraud on the part of the members of election committees. The probability to generate the right share of secret by an illegal intruder in case when he/she knows only a part of secret shares is determined.
Discussion and Conclusions. The described scheme is useful for electronic voting and in other spheres where methods of threshold cryptography are applied.

Ключевые слова: криптография, криптосистема с открытым ключом, схема Эль-Гамаля, конечные поля, пороговая криптография, разделение секрета, аффинная геометрия, проективные пространства, электронные выборы, задача Диффи-Хеллмана.

Keywords: cryptography, public-key cryptosystem, ElGamal encryption system, finite fields, threshold cryptography, secret sharing, affine geometry, projective spaces, electronic voting, Diffie-Hellman problem.

Образец для цитирования: Мазуренко, А. В. Геометрическая реализация метода проведения электронных выборов, основанного на пороговом разделении секрета / А. В. Мазуренко, В. А. Стукопин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 2. — С. 246–255. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-246-255

For citation: A.V. Mazurenko, V.A. Stukopin. Geometric realization of electronic elections based on threshold secret sharing. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 246–255. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-246-255

Введение. Авторами разработана криптосистема, основанная на пороговом разделении секрета, которую возможно применить при разработке протокола электронного голосования. Для шифрования и дешифрования голосов используется усиленная схема Эль-Гамаля. Согласно данной схеме генерируется некий секретный параметр, далее называемый секретом, являющийся элементом определенной циклической группы. Для разделения секрета между проверяющими авторами разработан способ, заключающийся в следующем: секрету взаимно однозначно ставится в соответствие некоторая прямая аффинного пространства, ассоциированного с векторным пространством k^n над конечным полем k, где $n \in \mathrm{N}$. Это аффинное пространство будем считать объемлющим пространством для всех рассматриваемых геометрических объектов. Далее проводится некоторая фиксированная плоскость через эту прямую. Эта плоскость объявляется каждому из проверяющих. Затем строится некоторое аффинное подпространство *M*, размерность которого совпадает с количеством проверяющих, и выделяется семейство подпространств, вложенных в *M* и образующих полный флаг. При этом *M* должно удовлетворять следующему свойству: результатом его пересечения с «публичной» плоскостью является в точности «секретная» прямая, причем данная прямая не лежит ни в каком собственном подпространстве, принадлежащем построенному семейству подпространств *M*. Итак, в качестве секретных долей используются попарно различные аффинные прямые, лежащие в аффинном подпространстве *M*, так что их число совпадает с размерностью *M*, а сами они порождают *M*. Для восстановления секрета необходимо найти прямую сумму секретных долей, что позволяет восстановить аффинное подпространство *M*, пересечение которого с «публичной» плоскостью дает «секретную» прямую, соответствующую в силу построенной биекции искомому секрету. Обладая секретным ключом, проверяющие могут расшифровать, согласно схеме Эль-Гамаля, голоса избирателей и в дальнейшем подвести итог голосования. В данной работе в качестве геометрии, при помощи которой будут реализованы описанные идеи, выбрана проективная геометрия.

На сегодняшний день существует множество работ, посвященных вопросам проведения электронного голосования. Многие из них нашли применение в странах, где такое голосование широко используется.

Данная работа носит исключительно теоретический характер и относится скорее к области алгебры и ее возможных приложений, при этом не претендуя на полноту изложения с точки зрения криптографии.

Постановка задачи. Построим криптосистему, основанную на пороговом разделении секрета [1], для обеспечения легитимных электронных выборов [2–5]. Можно выделить три стороны, которые будут участвовать в моделируемом процессе: администратор, проверяющие и избиратели. Администратор — доверенное лицо, которое обладает наибольшими полномочиями и является аналогом центра сертификации.

Представляет интерес задача создания таких условий, при которых ни один из проверяющих не был способен самостоятельно расшифровать шифротекст, представляющий собой результат голосования некоторого избирателя. В общем случае потребуем, чтобы для дешифрования потребовалось участие *t* проверяющих, где $1 < t$.

Основная часть. В работе будут использоваться следующие стандартные обозначения: N — множество натуральных чисел, $\langle X \rangle$ — линейная оболочка подмножества *X* некоторого линейного пространства *V*, $Ord(R)$ — порядок произвольной группы *R*, A^T — транспонированная матрица для матрицы *A*.

Предположим, что общее количество проверяющих $z = Nt$, где $z, N \in \mathrm{N}$. Пусть $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_z\}$ — множество проверяющих. Разделим их на команды из *t* человек. Пусть далее S_i обозначает *i*-ю команду, где $i = \overline{1, N}$, состоящую из определенных *t* проверяющих, то есть $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \ldots, s_{it}\}$, $\bigcup_{i=1}^{N} S_i = S$, $S_i \cap S_j = \varnothing$, где $i \neq j$, $i, j = \overline{1, N}$. Предположим, что все необходимые параметры генерирует администратор, за исключением оговоренных случаев.

В основе разработанной криптосистемы лежит усиленный вариант схемы Эль-Гамаля [6–8]. Согласно данной схеме, по известному алгоритму генерируются параметры (p, g), где *p* — простое число, а *g* —

порождающий элемент мультипликативной абелевой группы $G \subset Z_p^*$, причем порядок $Ord(G) = q$, где q — такое простое число, что $q = (p-1)/2$. Пара (p, g) объявляется частью открытого ключа.

Этап генерации секретного ключа. Сначала при помощи некоторого генератора псевдослучайных чисел необходимо получить случайное число $x \in \overline{1, q-1}$, принимаемое в качестве секретного ключа. Опишем разработанный метод, позволяющий разделить x на секретные доли, которые раздадут каждому из проверяющих.

Пусть $s \in \mathrm{N}$, r — некоторое простое число, $m \in \mathrm{N}$: $t \le m$. Обозначим проективное пространство размерности m над полем Φ_{r^s}, индуцированное векторным пространством $\Phi_{r^{s(m+1)}}$ над полем Φ_{r^s}, через $PG(m, r^s)$ или $PG(\Phi_{r^{s(m+1)}})$ [9]. Пусть $PG(m, r^s)$ состоит из множества точек, однородные координаты которых определяются как $(a_0 : a_1 : \ldots : a_m)$, $a_i \in \Phi_{r^s}$, $\exists$ $j \in \overline{0, m}$: $a_j \ne 0$. Всего в $PG(m, r^s)$ существует $\left(r^{(m+1)s} - 1\right)/\left(r^s - 1\right) = 1 + r^s + r^{2s} + \ldots + r^{ms}$ различных точек.

Положим далее, что $w = r^s$, α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, $\beta = \alpha^n$ — примитивный элемент поля Φ_w, где $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$, а также $q < w^{m+1}$, где, как было указано выше, $x \in \overline{1, q-1}$. Легко увидеть, что верна

Лемма 1. Рассмотрим множество $A = \{\alpha^0, \alpha^1, ..., \alpha^{n-1}\}$, где $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$. Тогда для всех α^i, $\alpha^j \in A$, $i \ne j$, выполняется условие $\alpha^i \ne \gamma\alpha^j$, где $\gamma \in \Phi_w^*$, $i, j \in \overline{0, n-1}$.

Рассмотрим векторное пространство $\Phi_{w^{m+1}}^{w-1}$ над полем Φ_w. Выделим подпространство

$$L = \{\bar{0}\} \cup \left\langle \left(\alpha^0, \beta\alpha^0, \ldots, \beta^{w-2}\alpha^0\right), \ldots, \left(\alpha^i, \beta\alpha^i, \ldots, \beta^{w-2}\alpha^i\right), \ldots, \left(\alpha^{n-1}, \beta\alpha^{n-1}, \ldots, \beta^{w-2}\alpha^{n-1}\right) \right\rangle$$

векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}^{w-1}$ над полем Φ_w, где $i \in \overline{0, n-1}$, $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$. Заметим, что $dim(L) = m+1$. Действительно, L содержит $n(w-1) + 1 = w^{m+1}$ точек. Тогда $dim(L) = log_w w^{m+1} = m+1$. Рассмотрим разбиение D множества $L \setminus \{\bar{0}\}$, определяемое семейством множеств: $A_i = \{\lambda(\alpha^i, \beta\alpha^i, \ldots, \beta^{w-2}\alpha^i) \mid \lambda \in \Phi_w^*\}$, где $i \in \overline{0, n-1}$, $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$. Из леммы 1 следует, что $A_i \cap A_j = \varnothing$, где $i \ne j$. Действительно, согласно лемме 1 для всех $\alpha^i, \alpha^j \in A$, $i, j \in \overline{0, n-1}$, $i \ne j$, выполняется условие $\beta^r\alpha^i \ne \beta^k\alpha^j$, где $r, k = \overline{0, w-2}$. Обозначим фактор-множество множества $L \setminus \{\bar{0}\}$ по отношению эквивалентности R_D, соответствующее разбиению D, через $PG'(m, w)$. Итак, $PG'(m, w)$ является проективным пространством размерности m над полем Φ_w, индуцированным векторным пространством L над полем Φ_w. Будем говорить, что $PG'(m, w)$ состоит из точек, однородные координаты которых имеют вид: $(\alpha^i) = (\alpha^i : \beta\alpha^i : \ldots : \beta^{w-2}\alpha^i)$, где α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, $\beta = \alpha^n$, $i = \overline{0, n-1}$, $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$. Таким образом, верна

Лемма 2. Количество точек в $PG'(m, w)$ равно $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$.

Рассмотрим произвольное векторное пространство V над некоторым полем k. Назовем каноническим проектированием отображение $\xi : (V \setminus \{\bar{0}\}) \to PG(V)$,

$$\xi(v) = [v], \tag{1}$$

сопоставляющее вектору $v \in V \setminus \{\bar{0}\}$ класс эквивалентности, определенный элементом v [9].

Пусть α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, где $\Phi_{w^{m+1}} = \Phi_w[x]/\left(f(x)\right)$, $f(x) \in \Phi_w[x]$ — минимальный многочлен α над полем Φ_w. Пусть, $\psi : PG'(m, w) \to PG(m, w)$

$$\psi\left((\alpha^i)\right) = (a_0 : a_1 : \ldots : a_m), \tag{2}$$

где $a_j \in \Phi_w$ — коэффициенты многочлена, являющегося представителем класса эквивалентности, соответствующего α^i в $\Phi_w[x]/\left(f(x)\right)$ с точностью до изоморфизма, $i = \overline{0, n-1}$, $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/(w-1)$, $j = \overline{0, m}$.

Теорема 1. Отображение Ψ является взаимно однозначным соответствием между множествами $PG'(m,w)$ и $PG(m,w)$. Более того, Ψ отображает проективные подпространства $PG'(m,w)$ на проективные подпространства $PG(m,w)$.

Доказательство. Положим, что $f_i(x)=\sum_{i=0}^{m} a_i x^i$ — представитель класса эквивалентности, соответствующий α^i в $\Phi_w[x]/(f(x))$. Тогда

$$\psi\left((\alpha^i : \beta\alpha^i : \ldots : \beta^{w-2}\alpha^i)_{1\times(w-1)}\right) = (a_0 : a_1 : \ldots : a_m)_{1\times(m+1)},$$

где $i=\overline{0,n-1}$, $n=\left(w^{m+1}-1\right)/\left(w-1\right)$. Легко проверить, что Ψ есть биекция. Действительно, из рассуждений перед леммами 1 и 2 следует, что достаточно проверить инъективность отображения Ψ. Пусть $(a_0 : a_1 : \ldots : a_m) = (b_0 : b_1 : \ldots : b_m)$, то есть $b_i = \lambda a_i$, где $i=\overline{0,m}$, $\lambda \in \Phi_w^*$. Поскольку $f_i(x)=\sum_{i=0}^{m} a_i x^i$ и $\lambda f_i(x)=\sum_{i=0}^{m} \lambda a_i x^i$ — представители классов эквивалентности, соответствующие α^j и $\lambda\alpha^j$ в $\Phi_w[x]/(f(x))$, то $\psi\left((\alpha^j)\right)=(a_0 : a_1 : \ldots : a_m)$ и $\psi\left((\lambda\alpha^j)\right)=(b_0 : b_1 : \ldots : b_m)$, где $j=\overline{0,n-1}$, $n=\left(w^{m+1}-1\right)/\left(w-1\right)$. Но $(\alpha^j)=(\lambda\alpha^j)$ в силу построения $PG'(m,w)$.

Пусть Z — векторное подпространство $\Phi_w[x]/(f(x))$, $\xi(Z\setminus\{\bar{0}\})$ — проективное подпространство $PG(m,w)$. Зафиксируем базис Z: $\{t_1,t_2,\ldots,t_k\}$, где $k=dim(Z)$. Тогда точки $\Psi^{-1}\left(\xi(t_i)\right)$, где $i=\overline{1,k}$, являются проективно независимыми, то есть, образуют некоторое проективное подпространство $H' \subset PG'(m,w)$: $\xi(Z\setminus\{\bar{0}\})=\psi(H')$.

Таким образом, проективные пространства $PG(m,w)$ и $PG'(m,w)$ над полем Φ_w изоморфны. В дальнейшем вместо $PG'(m,w)$ будем использовать обозначение $PG(m,w)$, отождествляя эти два множества.

Пусть α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, $\beta=\alpha^n$, где $n=\left(w^{m+1}-1\right)/\left(w-1\right)$. Рассмотрим отображение $\tau:\Phi^*_{w^{m+1}} \to PG(m,w)$,

$$\tau(\alpha^i\beta^j)=(\alpha^i), \tag{3}$$

где $i\in\overline{0,n-1}$, $j\in\overline{0,w-2}$. Из леммы 1 легко увидеть, что верна

Лемма 3. Отображение τ является сюръективным.

Пусть α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, $\beta=\alpha^n$, где $n=\left(w^{m+1}-1\right)/\left(w-1\right)$. Рассмотрим произвольное конечное поле Φ_{p^z}, где p^z — положительная степень некоторого простого числа $p,z\in\mathrm{N}$, $p^z \le w^{m+1}$, d — примитивный элемент поля Φ_{p^z}. Рассмотрим отображение $\mu:\Phi^*_{p^z}\to\Phi^*_{w^{m+1}}$,

$$\mu(d^y)=\alpha^y, \tag{4}$$

где $y\in\overline{0,p^z-2}$. Очевидно, что μ является инъективным отображением. Заметим, что любой элемент $a\in\Phi^*_{w^{m+1}}$ может быть единственным образом представлен в виде $a=\alpha^i\beta^j$, где $i\in\overline{0,n-1}$, $j\in\overline{0,w-2}$. Определим отображение $\delta:\Phi^*_{p^z}\to\Phi^*_w$,

$$\delta(b)=\beta^j, \tag{5}$$

где $\mu(b)=\alpha^i\beta^j$ для некоторых $i\in\overline{0,n-1}$, $j\in\overline{0,w-2}$.

Рассмотрим произвольное конечное поле Φ_{p^z}, где p — простое число, $z\in\mathrm{N}$, $p^z\le w^{m+1}$. Определим отображение $\phi:\Phi^*_{p^z} \to PG(m,w)\times\to\Phi^*_w$

$$\phi(b)=\left(\tau(\mu(b)),\delta(b)\right), \tag{6}$$

где используются ранее определенные отображения τ (3), μ (4), δ (5). Из лемм 1 и 3 легко увидеть, что верна

Теорема 2. Отображение ϕ является инъективным.

Вернемся к описанию разработанного алгоритма. Покажем, как сопоставить секрету точку проективного пространства. Секретный ключ x представляет собой элемент мультипликативной группы Z_q^*, где q — простое число, так что $x \in \overline{1, q-1}$. Для генерации секрета зафиксируем случайный порождающий элемент b циклической группы Z_q^* и некоторое целое число $i \in \overline{0, q-2}$, а затем положим $b^i = x$. Далее зафиксируем примитивный элемент α поля $\Phi_{w^{m+1}}$. Поскольку $q < w^{m+1}$, то можно рассмотреть ранее определенное инъективное отображение $\mu : Z_q^* \to \Phi_{w^{m+1}}^*$ (4). Итак, $\mu(b^i) = \alpha^i$, где $i \in \overline{0, q-2}$. Поскольку можно легко вычислить элемент α^n, где $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/\left(w-1\right)$, то $\alpha^i = \alpha^{vn+r}$, где $v \in Z$, $r \in N$, согласно алгоритму Евклида. Таким образом, используя отображение $\tau : \Phi_{w^{m+1}}^* \to PG(m, w)$ (3) получаем $\tau(\alpha^i) = \tau(\alpha^{vn+r}) = (\alpha^r)$. Также, исходя из определения $\delta : Z_q^* \to \Phi_w^*$ (5), вычисляем $\delta(b^i) = \alpha^{vn}$. Следовательно, отображение $\phi : Z_q^* \to PG(m, w) \times F_w^*$ (6) сопоставляет секретному ключу $\phi(x) = \left((\alpha^r), \alpha^{vn}\right)$. Публикуем значение $v \in Z$. Случайным образом строим проективную прямую $l \in PG(m, w)$: $(\alpha^r) \in l$. Полученная проективная прямая l публикуется. Итак, будем обозначать «секретную» точку, то есть точку, которая сопоставляется секрету при помощи отображения ϕ, через $(c) \in PG(m, w)$.

Далее администратор генерирует систему попарно различных проективных подпространств $\{M_i\}_{i=1}^N \subset PG(m, w)$ размерности $t-1$, таких что $M_i \cap l = (c)$, где $i = \overline{1, N}$, N — количество команд проверяющих. Так как число людей в одной команде $2 \le t \le m$, то размерность d создаваемых проективных подпространств в зависимости от t может принимать значения $1 \le d \le m-1$, то есть создаваемое проективное пространство может быть некоторой проективной прямой в случае $t = 2$, а при $t = m$ — проективной гиперплоскостью в $PG(m, w)$.

Пусть одним из построенных проективных подпространств будет $M' \subset PG(m, w)$. Пусть M есть t-мерное векторное подпространство векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w, для которого выполняется условие $\xi(M) = M'$, где ξ — ранее определенное каноническое проектирование (1). Рассмотрим максимальный флаг длины t, получаемый при помощи базисных векторов M $\{\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_t\} \subset \Phi_{w^{m+1}}$: $M_0 = \langle \overline{0} \rangle \subset M_1 = \langle \beta_1 \rangle \subset \ldots \subset M_t = \langle \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_t \rangle$. Тогда для «секретной» точки $(c) \in PG(m, w)$ и элемента $c' \in \Phi_{w^{m+1}}$: $\xi(c') = (c)$, должно выполняться условие $c' \in M_t \setminus M_{t-1}$. Необходимость соблюдения этого условия будет ясна из дальнейших рассуждений.

Существует несколько способов сгенерировать искомое $(t-1)$-мерное проективное подпространство $M' \subset PG(m, w)$. Опишем один из таких методов, который заключается в переходе от одного базиса к другому.

Зафиксируем некоторый базис $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_{m+1}\}$ векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w. Рассмотрим разложение элемента $c \ne 0$, $c \in \Phi_{w^{m+1}}$ по этому базису: $c = \sum_{i=1}^{m+1} v_i \beta_i$, где $v_i \in \Phi_w$. Пусть в этом разложении ровно $j \in \overline{1, m+1}$ коэффициентов $v_{k_1}, v_{k_2}, \ldots, v_{k_j}$ отличны от нуля, где $k_i \in \overline{1, m+1}$, $i = \overline{1, j}$. Перенумеруем элементы базиса β так, что для нового базиса β^j выполняется условие: $\beta_i^j := \beta_{k_i}$ и $l_i^j := l_{k_i}$, где $i = \overline{1, j}$, то есть в разложении c по базису β^j все коэффициенты отличные от нуля находятся на первых j позициях: $c = \sum_{i=1}^{j} l_i^j \beta_i^j = \sum_{i=1}^{m+1} v_i \beta_i$. Заметим, что в качестве такого начального базиса β удобнее всего выбрать полиномиальный базис, в силу построения $PG(m, w)$.

Если для рассматриваемого базиса β^j выполняется условие: $j = t$, то достигли желаемого результата.

Пусть $1 \le j \le t-1$. Зафиксируем некоторый элемент $l_{j+1}^{j+1} \in \Phi_w^*$. Приведем пример матрицы перехода $A_{j+1} \in GL_{m+1}(\Phi_w)$ от *j*-го базиса $\{\beta_i^j\}_{i=1}^{m+1}$ к $(j+1)$-му $\{\beta_i^{j+1}\}_{i=1}^{m+1}$ базису векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w, такому что $c = \sum_{i=1}^{j+1} l_i^{j+1}\beta_i^{j+1}$, где $l_i^{j+1} = l_i^j$, $i = \overline{1, j}$, $\beta_k^{j+1} = \beta_k^j$, где $k = \overline{1, m+1}$, $k \notin \overline{j, j+1}$, $\beta_j^{j+1} = \beta_j^j - \frac{\eta l_{j+1}^{j+1}}{l_j^{j+1}}\beta_{j+1}^j$, $\beta_{j+1}^{j+1} = \eta\beta_{j+1}^j$, где $\eta \in \Phi_w^*$ — произвольный, но зафиксированный, элемент. Пусть $\beta_v^{j+1} = (\beta_1^{j+1}, \beta_2^{j+1}, \ldots, \beta_{m+1}^{j+1})^T$, $\beta_v^j = (\beta_1^j, \beta_2^j, \ldots, \beta_{m+1}^j)^T$. Матрица A_{j+1}: $\beta_v^{j+1} = A_{j+1}\beta_v^j$, представляет собой единичную матрицу, за тем исключением что в ее $j+1$ столбце единственными ненулевыми элементами являются $a_{j,j+1} = -\frac{\eta l_{j+1}^{j+1}}{l_j^{j+1}}$ и $a_{j+1,j+1} = \eta$, находящиеся в *j*-ой и $(j+1)$-ой строках соответственно. Тогда $\beta_j^{j+1} = \beta_j^j - \frac{\eta l_{j+1}^{j+1}}{l_j^{j+1}}\beta_{j+1}^j$, $\beta_{j+1}^{j+1} = \eta\beta_{j+1}^j$ и $\beta_k^{j+1} = \beta_k^j$, где $k = \overline{1, m+1}$, $k \notin \overline{j, j+1}$. Таким образом, проделывая описанную процедуру $t-j$ раз, начиная с базиса β^j, получаем базис $\beta^t = \{\beta_1^t, \beta_2^t, \ldots, \beta_{m+1}^t\}$ векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w: $c = \sum_{i=1}^{t} l_i^t\beta_i^t$, где $l_i^t \in \Phi_w^*$, $i = \overline{1, t}$.

Пусть $t+1 \le j \le m+1$. Опишем матрицу перехода $B_{j-1} \in GL_{m+1}(\Phi_w)$ от *j*-го базиса $\{\beta_i^j\}_{i=1}^{m+1}$ к $(j-1)$-му $\{\beta_i^{j-1}\}_{i=1}^{m+1}$ базису векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w, такому что $c = \sum_{i=1}^{j-1} l_i^{j-1}\beta_i^{j-1}$, где $l_i^{j-1} = l_i^j$, $i = \overline{1, j-1}$, $\beta_k^{j-1} = \beta_k^j$, где $k = \overline{1, m+1}$, $k \notin \overline{j-1, j}$, $\beta_{j-1}^{j-1} = \beta_{j-1}^j + \frac{l_j^j}{l_{j-1}^{j-1}}\beta_j^j$, $\beta_j^{j-1} = \frac{\beta_j^j}{\eta}$, где $\eta \in \Phi_w^*$ — произвольный, но зафиксированный, элемент. Пусть $\beta_v^{j-1} = (\beta_1^{j-1}, \beta_2^{j-1}, \ldots, \beta_{m+1}^{j-1})^T$, $\beta_v^j = (\beta_1^j, \beta_2^j, \ldots, \beta_{m+1}^j)^T$. Матрица B_{j-1}: $\beta_v^{j-1} = B_{j-1}\beta_v^j$, представляет собой единичную матрицу, за тем исключением что в ее *j* столбце единственными ненулевыми элементами являются $b_{j-1,j} = \frac{l_j^j}{l_{j-1}^{j-1}}$ и $b_{j,j} = \frac{1}{\eta}$, находящиеся в $(j-1)$-ой и *j*-ой строках соответственно. Тогда $\beta_{j-1}^{j-1} = \beta_{j-1}^j + \frac{l_j^j}{l_{j-1}^{j-1}}\beta_j^j$, $\beta_j^{j-1} = \frac{\beta_j^j}{\eta}$ и $\beta_k^{j-1} = \beta_k^j$, где $k = \overline{1, m+1}$, $k \notin \overline{j-1, j}$. Таким образом, проделывая описанную процедуру $j-t$ раз, начиная с базиса β^j, получаем базис $\beta^t = \{\beta_1^t, \beta_2^t, \ldots, \beta_{m+1}^t\}$ векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w: $c = \sum_{i=1}^{t} l_i^t\beta_i^t$, где $l_i^t \in \Phi_w^*$, $i = \overline{1, t}$.

Таким образом, если $c' \in \Phi_{w^{m+1}}$: $\xi(c') = (c)$, где $(c) \in PG(m, w)$ — «секретная» точка, ξ — отображение (1), то, применяя вышеописанный метод, находим базис $\beta^t = \{\beta_1^t, \beta_2^t, \ldots, \beta_{m+1}^t\}$ векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w: $c' = \sum_{i=1}^{t} l_i^t\beta_i^t$, где $l_i^t \in \Phi_w^*$, $i = \overline{1, t}$. Отсюда можно построить *t*-мерное векторное подпространство $M = \left\langle \beta_1^t, \beta_2^t, \ldots, \beta_t^t \right\rangle \subset \Phi_{w^{m+1}}$: $c' \in M_t \setminus M_{t-1}$, где $M_{t-1} = \left\langle \beta_1^t, \beta_2^t, \ldots, \beta_{t-1}^t \right\rangle$, $M_t = M$. Рассмотрим линейно независимые элементы y и c' векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w, причем $y \notin M$. Зафиксируем двумерное подпространство $l' = \left\langle c', y \right\rangle \subset \Phi_{w^{m+1}}$. Тогда проективно независимые точки $\xi(\beta_i^t) \in PG(m, w)$, где $i = \overline{1, t}$, являются секретными долями, раздаваемые одной из команд, а проективная прямая $\xi(l') = l \subset PG(m, w)$ – частью открытого ключа, где ξ — ранее определенное каноническое проектирование (1).

Открытый ключ. Открытый ключ состоит из последовательности $(p, g, y = g^x)$, где p — простое число, g — порождающий элемент мультипликативной абелевой группы $G \subset Z_p^*$, причем порядок группы $Ord(G) = q$, где q — такое простое число, что $q = (p-1)/2$, x — секретный ключ: $x \in \overline{1, q-1}$. Также параметрами открытого ключа являются α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, пара (w, m), где w — положительная степень некоторого простого числа, $m \in \mathrm{N}$, проективная прямая $l \subset PG(m, w)$, которой принадлежит «секретная» точка, целое число $v \in \mathrm{Z}$, используемое при восстановлении секрета, описание инъективного отображения $\rho : \Phi_r^z \to G$, где $r^z < q$, r — простое число, $z \in \mathrm{N}$ — число кандидатов.

Этап голосования и шифрования «голоса». Пусть выборы проходят по следующим правилам: 1. всего участвуют $z \in \mathrm{N}$ кандидатов; 2. проголосовать можно только за одного кандидата. Все голоса будут представлять собой некоторые элементы векторного пространства Φ_r^z над полем Φ_r, где r — простое число (см. описание строения открытого ключа). Поскольку $r^z < q$, то можно построить инъективное отображение из Φ_r^z в G, которое будем обозначать через $\rho : \Phi_r^z \to G$. Положим, что избиратель проголосовал за i-го кандидата, где $i = \overline{1, z}$. Тогда $\overline{u} = (a_1, a_2, \ldots, a_{i-1}, 1, a_{i+1}, \ldots, a_z) \in \Phi_r^z$, где $a_j \in \Phi_r$: $a_j \neq 1$, $j = \overline{1, z}$, $j \neq i$, является открытым текстом. Далее происходит сопоставление вектору $\overline{u}$ некоторого элемента $h \in G$: $\rho(\overline{u}) = h$. Затем избиратель генерирует произвольное число $k \in \overline{1, q-1}$, равномерно распределенное в Z_q^*, и на основе публичного ключа применяет отображение $E : G^2 \to G^2$, $E(k, h) = (g^k, y^k h)$, задающее шифрование по схеме Эль-Гамаля. $E(k, z)$ является шифротекстом, который отправляется проверяющим.

Этап дешифрования «голоса». Все множество голосов можно разбить среди N команд, чтобы уменьшить время подсчета голосов.

Определим отображение $D : G^2 \to G$, $D\left((g^k, y^k h)\right) = g^{-xk} y^k h = h$, задающее дешифрование по схеме Эль-Гамаля, где x — секретный ключ.

Перед тем как расшифровать полученные шифротексты проверяющим понадобится восстановить секретный ключ $x \in \overline{1, q-1}$. Пусть какая-то из команд S_i, где $i = \overline{1, N}$, пытается восстановить x. Для этого каждый из участников $s_{ij} \in S_i$ публикует свою секретную долю $(\beta_{ij}) \in PG(m, w)$, где $j = \overline{1, t}$. Прямая сумма системы проективно независимых точек $\{(\beta_{ij})\}_{j=1}^t$ равна проективному подпространству $M_i \subset PG(m, w)$: $M_i \cap l = (c)$, где $l \subset PG(m, w)$ — известная проективная прямая, (c) — «секретная» точка. Опишем один из способов нахождения данного пересечения.

Пусть $\{\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_{m+1}\}$ — базис векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w, построенный на этапе генерации секретных долей. Тогда $M = \langle \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_t \rangle$ — векторное подпространство $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w: $\xi(M)$ — проективное подпространство $PG(m, w)$, равное прямой сумме секретных долей. Рассмотрим двумерное векторное подпространство $l' \subset \Phi_{w^{m+1}}$, такое что $\xi(l') = l \subset PG(m, w)$, где l — известная из публичного ключа проективная прямая, содержащая «секретную» точку. Векторное подпространство, получаемое в результате пересечения $M \cap l'$, должно быть одномерным подпространством векторного пространства $\Phi_{w^{m+1}}$ над полем Φ_w. Зафиксируем некоторое множество базисных векторов $\{y, h\}$, порождающих подпространство $l' = \langle y, h \rangle$, где y, $h \in \Phi_{w^{m+1}}$. Следовательно, не нарушая общность рассуждений, можно положить, что $y \notin M$, а координата вектора y: $y_{t+1} \in \Phi_w^*$. Для вектора, принадлежащего $v \in M \cap l'$, выполняется условие: $v = \sum_{i=1}^t v_i \beta_i = \lambda_1 y + \lambda_2 h$, где λ_1, $\lambda_2 \in \Phi_w$. Таким образом, для нахождения пересечения необходимо решить следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 & y_1 & h_1 \\ 0 & -1 & \cdots & 0 & y_2 & h_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & y_t & h_t \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & y_{t+1} & h_{t+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & y_{m+1} & h_{m+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_t \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Ранг данной матрицы должен равняться $t+1$, что возможно тогда и только тогда, когда $\left(y_{t+1}h_i - y_i h_{t+1}\right)/ y_{t+1} = 0$, $i \in \overline{t+2, m+1}$. Легко увидеть, что если A — линейное отображение, соответствующее матрице данной СЛАУ, то

$$x \in ker(A) \Leftrightarrow x = \lambda_2 \begin{pmatrix} \frac{y_{t+1}h_1 - y_1 h_{t+1}}{y_{t+1}} & \frac{y_{t+1}h_2 - y_2 h_{t+1}}{y_{t+1}} & \cdots & \frac{y_{t+1}h_t - y_t h_{t+1}}{y_{t+1}} & -\frac{h_{t+1}}{y_{t+1}} & 1 \end{pmatrix}^T,$$

где $\lambda_2 \in \Phi_w$. Рассмотрим элемент $x' = \sum_{i=1}^{t} \frac{y_{t+1}h_i - y_i h_{t+1}}{y_{t+1}} \beta_i = \alpha^s \in \Phi_{w^{m+1}}$, α — примитивный элемент поля $\Phi_{w^{m+1}}$, $s \in \overline{0, w^{m+1} - 2}$. Итак, $x' = \alpha^s = \alpha^r \alpha^{nl}$, где $r \in \overline{0, n-1}$, $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/\left(w-1\right)$, $l \in Z$. Следовательно, при помощи отображения τ (3) получаем $\tau(x') = \tau(\alpha^r \alpha^{nl}) = (\alpha^r) \in PG(m, w)$ — «секретную» точку. Далее применяем левое обратное отображение $\varphi^{-1} : PG(m, w) \times \Phi_w^* \to Z_q^*$ к (6), и — $\mu^{-1} : \Phi_{w^{m+1}}^* \to Z_q^*$ к (4), а также известное из публичного ключа $v \in Z$: $\varphi^{-1}\left((\alpha^r), \alpha^{nv}\right) = \mu^{-1}(\alpha^r \alpha^{nv}) = \mu^{-1}(\alpha^i) = b^i = x$, где $i \in \overline{0, q-2}$, b — порождающий элемент Z_q^*, x — секретный ключ.

Предположим, что необходимо расшифровывать шифротекст $E(k, h) \in G^2$. Для этого используем отображение $D\left(E(k, h)\right) = h \in G$. Для того чтобы восстановить вектор $\overline{u} \in \Phi_r^z$, являющийся открытым текстом, применим отображение $\gamma^{-1} : G \to \Phi_r^z$, которое является левым обратным к общеизвестному инъективному отображению γ, то есть $\gamma^{-1}(h) = \overline{u}$.

Определение результатов голосования. Пусть $U = \{\overline{u}_i\}_{i=1}^{d} \subset \Phi_r^z$ — множество всех «голосов», где $d \in N$, $\lambda : \Phi_r^z \to \Phi_r^z$, $\lambda(\overline{u}) = (0, 0, \ldots 0, 1_i, 0, \ldots 0)$, если i-й элемент вектора $\overline{u}$ равен 1, $i \in \overline{1, z}$. После дешифрования «голосов» находим вектор $\overline{R} = \sum_{i=1}^{d} \lambda(\overline{u}_i) \in Z^z$, где j-ый элемент $\overline{R}$ в силу предыдущих рассуждений представляет собой количество голосов за j-го кандидата, $j \in \overline{1, z}$. Вектор $\overline{R}$ публикуется и объявляется результатом выборов.

Теорема 3. Если злоумышленнику известно множество проективных точек $U \subset PG(m, w)$, являющихся секретными долями, где $|U| \le t-1$, то вероятность того, что он правильно сгенерирует «секретную» точку равна $1/(w+1)$.

Доказательство. Поскольку злоумышленнику известна проективная прямая $l \subset PG(m, w)$, которой принадлежит искомая «секретная» точка (c), то вероятность сгенерировать верную «секретную» точку перед началом каких-либо преобразований равна $1/(w+1)$. Действительно, произвольная проективная прямая, принадлежащая $PG(m, w)$, содержит $w+1$ точек. Имея в своем распоряжении публичный ключ, злоумышленник знает элемент $v \in Z$: $c' = \alpha^i \alpha^{vn}$, где $\tau(c') = \tau(\alpha^i \alpha^{vn}) = (\alpha^i) = (c)$ (3), $i \in \overline{0, n-1}$, $n = \left(w^{m+1} - 1\right)/\left(w-1\right)$. Но в силу построения сюръективного отображения τ для любого из n элементов вида α^j, где $j \in \overline{0, n-1}$, $\tau(\alpha^j \alpha^{vn}) = (\alpha^j)$, то есть вероятность сгенерировать верный «секретный» ключ по элементу $\alpha^{vn} \in \Phi_w^*$ равна $1/n = (w-1)/(w^{m+1} - 1)$. Пусть злоумышленник, используя проективно независимые точки, из которых состоит множество $U \subset PG(m, w)$, строит проективное подпространство $W \subset PG(m, w)$, размерность

которого строго меньше $t-1$. Поскольку при восстановлении «секретной» точки ищется прямая сумма всех секретных долей, то проективное подпространство W не пересекается с проективной прямой l в силу построения множества U. Итак, злоумышленнику известно, что искомая «секретная» точка не принадлежит U. Для любой точки $(s) \in l$ проективное подпространство $\langle U \cup (s) \rangle \subset PG(m,w)$ имеет размерность меньшую либо равную $t-1$. Тогда вероятность того, что (s) является искомой точкой, равна $1/(w+1)$.

Выводы. В работе описан разработанный авторами способ организации электронных выборов, в основе которых лежит использование схемы Эль-Гамаля и метода порогового разделения секрета, опирающегося на свойства проективных пространств, заданных над конечными полями. Построен полиномиальный детерминированный алгоритм, криптографическая стойкость которого опирается на общепризнанно трудноразрешимую проблему Диффи-Хеллмана в конечном поле [10]. Доказано, что предложенные методы позволяют защитить передаваемые от нечестных проверяющих данные за счет особенности способа генерации секретных долей, представляющих собой точки некоторого проективного пространства. Таким образом, определена вероятность создания злоумышленником верной секретной доли при условии, что ему известна лишь некоторая часть секретных долей.

Библиографический список

1. Могилевская, Н. С. Пороговое разделение файлов на основе битовых масок: идея и возможное применение / Н. С. Могилевская, Р. В. Кульбикаян, Л. А. Журавлев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011 — Т. 11, 10. — С. 1749–1755.

2. Rubin, A. D. Security considerations for remote electronic voting / A. D. Rubin // Communications of the ACM. – 2002. – V. 45(12). – P. 39–44.

3. Kiayias, A. An Internet voting system supporting user privacy / A. Kiayias, M. Korman, D. Walluck // ACSAC’06: Proceedings of the 22nd Annual Computer Security Applications Conference. – 2006. – P. 165–174.

4. Jefferson, D. Analyzing internet voting security / D. Jefferson, A. D. Rubin, B. Simons, D. Wagner // Communications of the ACM. – 2004. – V. 47(10). – P. 59–64.

5. Chaum, D. Secret-ballot receipts: True voter-verifiable elections / D. Chaum // IEEE Security and Privacy. – 2004. – V. 2(1). – P. 38–47.

6. Алферов, А. П. Основы криптографии: учебное пособие / А. П. Алферов, А. Ю. Зубов, А. С. Кузьмин, А. В. Черемушкин. — Москва : Гелиос-АРВ, 2001. — 480 с.

7. Рябко, Б. Я. Криптографические методы защиты информации / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов. — Москва : Горячая линия-Телеком, 2005. — 229 с.

8. Коблиц, Н. Курс теории чисел и криптографии / Н. Коблиц. — Москва : ТВП, 2001. — 254 с.

9. Кострикин, А. И. Введение в алгебру / А. И. Кострикин. — Москва : МЦНМО, 2009. — 368 с.

10. Ian, F. Blake. On the complexity of the discrete logarithm and Diffie-Hellman problems / F. Blake Ian, Theo Garefalakis // J. Complex. – 2004. – V. 20(2-3). – P. 148–170.

References

1. Mogilevskaya, N.S., Kulbikayan, R.V., Zhuravlev, L.A. Porogovoe razdelenie faylov na osnove bitovykh masok: ideya i vozmozhnoe primenenie. [Threshold file sharing based on bit masks: concept and possible use.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 10, pp. 1749–1755 (in Russian).

2. Rubin, A. D. Security considerations for remote electronic voting. Communications of the ACM, 2002, vol. 45(12), pp. 39–44.

3. Kiayias, A., Korman, M., Walluck, D. An Internet voting system supporting user privacy. ACSAC’06: Proceedings of the 22nd Annual Computer Security Applications Conference, 2006, pp. 165–174.

4. Jefferson, D., Rubin, A. D., Simons, B., Wagner, D. Analyzing internet voting security. Communications of the ACM, 2004, vol. 47(10), pp. 59–64.

5. Chaum, D. Secret-ballot receipts: True voter-verifiable elections. IEEE Security and Privacy, 2004, vol. 2(1), pp. 38–47.

6. Alferov, A.P., Zubov, A.Yu., Kuzmin, A.S., Cheremushkin, A.V. Osnovy kriptografii: uchebnoe posobie. [Basics of Cryptography.] Moscow: Gelios-ARV, 2001, 480 p. (in Russian).

7. Ryabko. B.Ya., Fionov, A.N. Kriptograficheskie metody zashchity informatsii. [Cryptographic methods of information protection.] Moscow: Hot line -Telekom, 2005, 229 p. (in Russian).

8. Koblitz, N. Kurs teorii chisel i kriptografii. [Course of number theory and cryptography.] Moscow: TVP, 2001, 254 p. (in Russian).

9. Kostrikin, A.I. Vvedenie v algebru. [Introduction to Algebra.] Moscow: MTsNMO, 2009, 368 p. (in Russian).

10. Ian, F. Blake, Garefalakis, Theo. On the complexity of the discrete logarithm and Diffie-Hellman problems. J. Complex, 2004, vol. 20(2-3), pp. 148–170.

Поступила в редакцию 06.12.2017
Сдана в редакцию 07.12.2017
Запланирована в номер 15.03.2018

Received 06.12.2017
Submitted 06.12.2017
Scheduled in the issue 17.03.2018

Об авторах:

Мазуренко Александр Вадимович,
математик-программист ООО "ДДОС-Гвард"
(РФ, 344002, Ростов-на-Дону, пр. Буденовский, 62/2)
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9541-3374
mazurencoal@gmail.com

Стукопин Владимир Алексеевич,
и.о. зав. каф. «Математика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, доцент
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9911-8962
stukopin@mail.ru

Authors:

Mazurenko, Alexander V.,
mathematician-programmer, DDoS-GUARD LLC (RF, 344002, Rostov-on-Don, Budenovskiy pr. 62/2)
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9541-3374
mazurencoal@gmail.com

Stukopin, Vladimir A.,
acting head of the Mathematics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Phys.-Math.), associate professor
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9911-8962
stukopin@mail.ru

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 28.03.2018.,
дата выхода в свет 30.03.2018.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,6.
Гарнитура «Times New Roman»
Тираж 1000 экз.
Заказ № 29/06
Цена свободная.

The issue is prepared by:
Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 28.06.2018,
imprint date 30.06.2018.
Format 60×84/8. C.p.sh. 22.6
Font «Times New Roman»
Circulation 1000 cop.
Order no. 29/06
Free price.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru
http://vestnik.donstu.ru/

Founder’s, publisher’s and printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia.
Phone: +7 (863) 2-738-372
E-mail: vestnik@donstu.ru
http://vestnik.donstu.ru/